



# ZMĚNA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ S KRÁTKOVLÁKENNÝM ČEDIČEM VLIVEM LISOVÁNÍ

## Diplomová práce

*Studijní program:* N3108 – Průmyslový management  
*Studijní obor:* 3106T014 – Produktový management  
*Autor práce:* **Jan Möbius**  
*Vedoucí práce:* Ing. Miroslava Maršálková, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC  
Faculty of Textile Engineering



# ALTERATION OF MECHANICAL ATTRIBUTES IN COMPOSITE MATERIALS CONTAINING SHORT FIBRE BASALT DUE TO MOULD PRESSING

## Diploma thesis

*Study programme:* N3108 – Industrial Management  
*Study branch:* 3106T014 – Product management  
*Author:* **Jan Möbius**  
*Supervisor:* Ing. Miroslava Maršálková, Ph.D.



Tento list nahrad' te  
originálem zadání.

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Datum:

Podpis:

## PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucí mé diplomové práce Ing. Miroslavě Maršálkové, Ph.D. za pomoc a odborné vedení při zpracování zadaného tématu.

V neposlední řadě patří velký dík mé rodině a blízkým, kteří mě podporovali po celou dobu studia na vysoké škole.

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce s názvem Změna mechanických vlastností kompozitních materiálů s krátkovlákněným čedičem vlivem lisování je rozdělena do tří částí. První část se zabývá obecnou charakteristikou vlastností kompozitních materiálů. Poté je zde popsána výroba, použití a vlastnosti čedičových vláken, ale také použitá matrice.

Druhá část, experimentální, se zabývá výrobou vzorků kompozitu z Lukosilu M 130 a krátkovlákněného čediče tak, že odpadový materiál je smíchán spolu s Lukosilem M 130 a z výsledného materiálu jsou připraveny vzorky o různých tloušťkách. Následně jsou popsány zkoušky a přístroje, které byly použity pro testování kompozitů.

Poslední část se zabývá diskuzí výsledků. Obsahuje slovní a grafické vyjádření dosažených výsledků testů a jejich shrnutí.

### **KLÍČOVÁ SLOVA:**

- kompozitní materiál,
- matrice,
- výztuž,
- čedičová vlákna,
- Lukosil M 130,
- dynamicko - mechanická analýza.

## **ABSTRACT**

This thesis called Alteration of mechanical attributes in composite materials containing short fibre basalt due to mould pressing has been divided into three parts. The first part deals with general characteristics of composite materials. Secondly, there is production, utilisation and attributes being described, as well as used matrix, too.

Second part, the experimental one, focuses on production of composite samples from Lukosil M 130 and short fibre basalt so that waste material is mixed with together with Lukosil M 130 and from resulting material samples of various thickness are produced. Then there are procedures and machines that were used to test composites and samples from Lukosil M 130.

The last part deals with discussion of results. It contains oral and graphic description of test results and the way these results have been reached.

### **KEY WORDS:**

- composite material,
- matrix,
- reinforcement,
- basalt fibre,
- Lukosil M 130,
- dynamic - mechanical analysis.

## **Seznam použitých zkratk a symbolů**

$l$	činná délka [mm]
$b$	šířka vzorku [mm]
$h$	výška vzorku [mm]
$T$	teplota [°C]
$f$	frekvence [Hz]
$t$	čas [min]
$E^*$	komplexní modul $E$ [MPa]
$E'$	reálná část modulu $E$ [MPa]
$E''$	imaginární část modulu $E$ [MPa]
$\delta$	ztrátový uhel [°]
$\text{tg}\delta$	ztrátový činitel [-]
$\lambda$	amplituda [mm]
$E_c$	energie nárazu kladiva do vzorku [J]
$a_{cU}$	rázová houževnatost [J/mm <sup>2</sup> ]



## **OBSAH**

<b>ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>1. LITERÁRNÍ ČÁST .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1. Kompozitní materiály.....</b>	<b>12</b>
1.1.1. Klasifikace kompozitů .....	14
1.1.1.1. Klasifikace kompozitů dle druhu matrice .....	14
1.1.1.2. Klasifikace kompozitů dle druhu výztuže .....	15
1.1.2. Vlákněné výztuže.....	16
1.1.3. Vlastnosti vláknových kompozitů.....	17
1.1.4. Použití kompozitů .....	18
<b>1.2. Výztuž .....</b>	<b>19</b>
1.2.1. Čedič .....	19
1.2.1.1. Složení čediče .....	20
1.2.1.2. Výroba čedičových vláken.....	21
A. Výroba krátkých čedičových vláken .....	21
B. Výroba kontinuálních čedičových vláken .....	22
1.2.1.3. Vlastnosti čedičových vláken .....	23
1.2.1.4. Použití čedičových vláken .....	24
1.2.1.4.1. Možnosti využití .....	24
<b>1.3. Matrice.....</b>	<b>26</b>
1.3.1. Lukosil M130.....	27
1.3.1.1. Uplatnění Lukosilu M 130 .....	28
<b>2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....</b>	<b>29</b>
<b>2.1. Výroba kompozitních vzorků .....</b>	<b>29</b>
2.1.1. Potřebný materiál a pomůcky .....	29
2.1.2. Postup výroby vzorků pouze pěstováním .....	31
2.1.3. Postup výroby vzorků pěstováním a lisováním .....	32
2.1.4. Příprava vzorků pro měření.....	34
<b>2.2. Hodnocení vlastností kompozitních materiálů.....</b>	<b>35</b>
2.2.1. 3 – Point bending na dynamicko – mechanické analýze .....	35

2.2.2.	Charpy test .....	40
2.2.3.	Objemová měrná hmotnost .....	41
<b>2.3.</b>	<b>Diskuze výsledků.....</b>	<b>43</b>
2.3.1.	Objemová měrná hmotnost kompozitních vzorků .....	43
2.3.2.	Modul pružnosti měřený na DMA DX04T .....	45
2.3.3.	Rázová houževnatost .....	54
2.3.4.	Celkové vyhodnocení mechanických vlastností .....	57
A.	Porovnání kompozitů z hlediska výšky .....	57
B.	Porovnání kompozitů z hlediska technologie výroby .....	60
2.3.5.	Detailní pohled na lom vzorků.....	63
<b>3.</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>66</b>
<b>4.</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>68</b>
	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>71</b>
	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>73</b>
	<b>Seznam příloh.....</b>	<b>74</b>

## ÚVOD

Kompozitní materiály získávají stále větší uplatnění v průmyslu. Používají se všude, kde je zapotřebí výborných mechanických vlastností. Nepřehlédnutelnou výhodou kompozitních materiálů je jejich několika násobně nižší hmotnost oproti jiným materiálům se zachováním dobrých mechanických vlastností. Kompozitní materiály jsou z hlediska průmyslu jedním z nejperspektivnějších a nejrychleji rostoucích odvětví, a proto je důležité získávat o nich stále nové informace a tím pomáhat jejich vývoji.

Nároky odběratelů na fyzikální, chemické a tepelně odolné technické materiály se stále zvyšují, proto je zapotřebí se této oblasti také věnovat. Velkou část této oblasti dokážou uspokojit čedičová vlákna díky své fyzikální, chemické a tepelné stálosti. Čedičová vlákna předčí svými vlastnostmi vlákna skleněná a azbestová, které začínají úspěšně nahrazovat. Vlákna skleněná, především svojí přijatelnější cenou, a vlákna azbestová hlavně pro svou zdravotní nezávadnost, protože vlákna azbestová jsou karcinogenní.

Tato diplomová práce je rozdělena do několika částí. V teoretické části diplomové práce je popisován kompozitní materiál jeho vlastnosti, výroba a použití. Také je zde popisováno složení čediče, jeho zpracování, vlastnosti vláken a jejich využitelnost v praxi. V další kapitole jsou popsány vlastnosti a využití Lukosilu M 130, který byl použit jako matrice do kompozitu.

V experimentální části je popsána výroba zkoušeného kompozitu, popis použitých přístrojů, na kterých byly prováděny zkoušky. Je zde vypracován jednoduchý popis postupu měření na přístrojích.

V poslední části jsou uvedeny naměřené hodnoty, porovnány mezi sebou a znázorněny v grafech. V závěru je diskuze o výsledcích a využití zkoušeného kompozitu.

## 1. LITERÁRNÍ ČÁST

### 1.1. Kompozitní materiály

Kompozity jsou heterogenní materiály složené ze dvou nebo více odlišných složek. Tyto složky se liší svými chemickými, mechanickými a fyzikálními vlastnostmi. Kompozity jsou tvořeny matricí a výztuží. Matrice je poddajnější a spojitá složka. Výztuž je složka nespojitá. [6, 14]

Kompozity mohou být jednovrstvé a vícevrstvé. Jednovrstvé kompozity jsou tvořeny dlouhými vlákny, která jsou orientovaná jednosměrně nebo dvousměrně. Také mohou být tvořena krátkými vlákny, která jsou nahodile orientovaná. Mezi vícevrstvé kompozity patří lamino, laminát a hybridní laminát. Vícevrstvé kompozity skládající se z materiálů, které jsou v každé vrstvě stejné, se nazývají lamináty. Hybridní laminát se skládá z vrstev, které jsou tvořeny různými materiály. Lamino je jedna vrstva vícevrstvého vláknového kompozitu. [12]

Materiál lze klasifikovat jako kompozit pouze v případě pokud splňuje tyto podmínky:

- vlastnosti složek se výrazně liší,
- složky jsou oddělitelné rozhraním,
- výroba kompozitního materiálu spočívá v mechanickém mísení komponent,
- podíl výztuže v kompozitním materiálu je větší než 5 %,
- výztuž je pevnější a tužší než matrice,
- kombinací složek vznikají podstatně lepší vlastnosti v porovnání s vlastnostmi samostatných složek, včetně součtu všech vlastností jednotlivých složek.

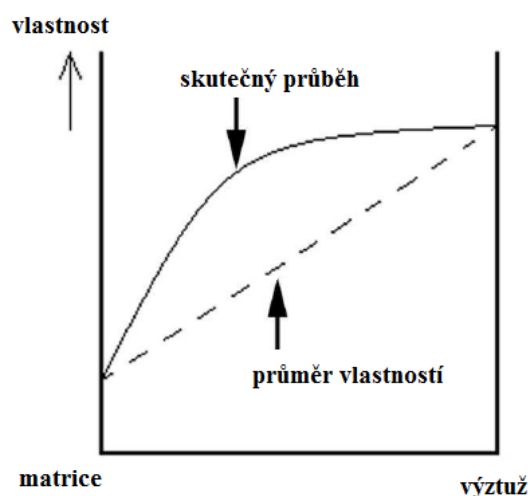
#### Synergický efekt

Synergický efekt vznikne, pokud jednotlivé složky vzájemně spolupracují, tj. alespoň jedna vlastnost kompozitu je lepší než průměr vlastností jednotlivých složek kompozitu. Tento efekt lze vysvětlit jako situaci, kdy výsledný celek vlastností je vyšší než pouhý

Změna mechanických vlastností kompozitních materiálů s krátkovlákněným čedičem vlivem lisování  
součet vlastností jednotlivých složek. Platí tedy, že  $1+1=3$ . Při navrhování kompozitů  
vždy hledáme nejvhodnější uspořádání složek tak, aby byl synergický efekt co nejvyšší.  
[11]

Při navrhování kompozitů je žádoucí, aby synergický efekt byl, co nejvyšší a na  
kompozity jsou kladeny tyto požadavky:

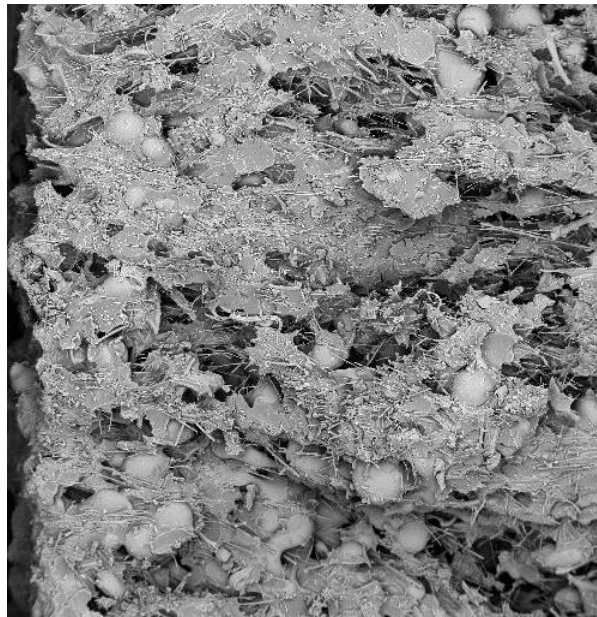
- zlepšení mechanických vlastností (zvýšení pevnosti, tuhosti a jejich udržení při vysoké teplotě, snížení měrné hmotnosti, zvýšení houževnatosti);
- zlepšení tepelných vlastností (zvýšení teplotní stability, snížení teplotní roztažnosti);
- modifikace elektrických vlastností;
- zvýšení mechanického tlumení (antivibrační materiály, protihlukové materiály);
- snížení propustnosti pro kapaliny a plyny, nasákavosti;
- zvýšení korozní nebo chemické odolnosti;
- snížení negativního dopadu na životní prostředí;
- snížení ceny. [2]



Obr. č. 1.1: Průběh synergického efektu [11]

### **1.1.1. Klasifikace kompozitů**

Nejběžnější rozdělení kompozitů je podle druhu matrice, podle druhu výztuže. Vzhledem k jejich širokému sortimentu je však možné je dělit i jinými způsoby, například dle použití.



Obr. č. 1.2: Mikroskopický pohled na řez vlákněného kompozitu

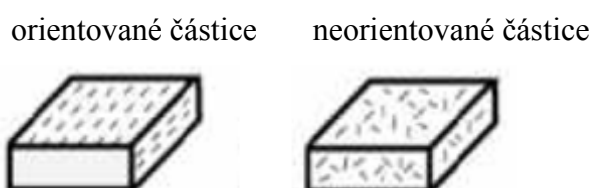
#### **1.1.1.1. Klasifikace kompozitů dle druhu matrice**

- polymerní matrice
- skleněná matrice
- sklokeramická matrice
- keramická matrice
- uhlíková matrice [12]

### 1.1.1.2. Klasifikace kompozitů dle druhu výztuže

#### • Částicové výztuže

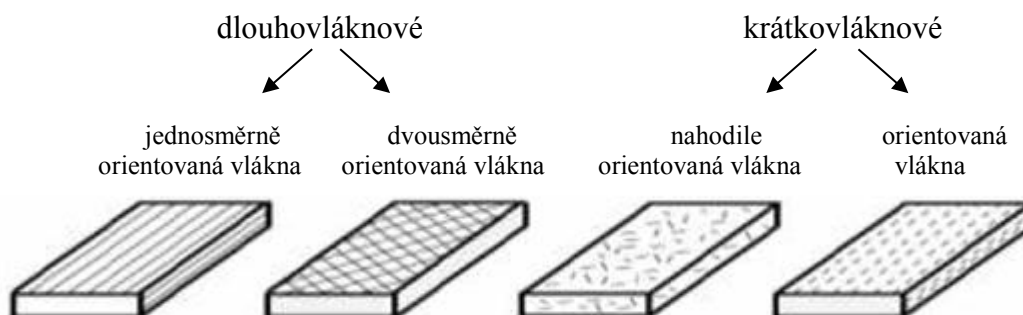
Využívají se zejména kvůli zvýšení tvrdosti, otěruvzdornosti a odolnosti při zvýšených teplotách. Výhoda částicových kompozitů ve srovnání s vláknovými kompozity je ta, že většinou vlákna vyztužený materiál je vyroben v jednom kroku s konečným produktem a je složité oddělit od sebe užitečné vlastnosti materiálu od vlastnosti výrobku. Částicové výztuže jsou rozdílné v tom, že mají vlastnosti nezávislé na směru (jsou izotropní). [14, 15]



Obr. č. 1.3: Dělení částicové výztuže [3]

#### • Vláknové výztuže

U vláknových výztuží je jako výztuž použit materiál, u kterého výrazně převažuje jeden rozměr oproti zbývajícím dvěma rozměrům. Tyto výztuže dělíme na kompozity s krátkými nebo dlouhými vlákny. Orientace těchto vláken může být nahodilá či uspořádaná. Krátká vlákna jsou mnohem menší ve srovnání s daným výrobkem, dlouhá vlákna jsou svou velikostí srovnatelná. [14]



Obr. č. 1.4: Dělení vláknové výztuže [3]

#### • Kombinované výztuže

Výztuž kompozitů je tvořena z vláken i částic. [15]

### **1.1.2. Vlákenné výztuže**

Na základě jejich vlastností lze vláknové kompozity třídit na jednovrstvé a vícevrstvé. Jednovrstvé kompozity mohou být ve skutečnosti tvořeny několika vrstvami stejných vlastností a orientace, a tak je lze považovat za jednu. Vícevrstvé kompozity se skládají z více totožných vrstev vláknových kompozitů s různou orientací. Nazýváme je lamináty. Hybridní lamináty pak sestávají z vrstev různého materiálového složení. [8]

- Jednovrstvé
  - Dlouhovláknové
    - Jednosměrné vyztužení
    - Dvousměrné vyztužení
  - Krátkovláknové
    - Nahodilá orientace
    - Přednostní orientace
- Mnohovrstvé
  - Lamináty – kompozit, jehož materiály složek jsou v každé vrstvě stejné
  - Hybridní lamináty – kompozit, který je v jednotlivých vrstvách tvořen různými složkami

V jednosměrně vyztužené vrstvě jsou vlákna v matici navzájem rovnoběžná. Při tomto uspořádání má kompozit ve směru vláken mnohem větší pevnost a tuhost než ve směru kolmo k vláknům. Tento typ anizotropie se nazývá ortotropie. Výsledné vlastnosti vícevrstvého kompozitu pak plynou ze společného působení jednotlivých vrstev, které se i při jednoosé zatíženém kompozitu nacházejí ve stavu víceosé napjatosti. Tyto vlastnosti lze predikovat využitím známých modelů. [1]



### **1.1.3. Vlastnosti vláknových kompozitů**

Kompozitní materiály jsou v podstatě „šité na míru“ konečné aplikaci nejen strukturou a vlastnostmi, ale i výrobní technologií. Každý kompozitní materiál představuje vlastní technologii výroby, složení, poměr matrice a výztuže. V závislosti na složení a poměru se dále odvíjí vlastnosti jednotlivých kompozitů. [1, 8]

#### Vysoká pevnost

Kompozity jsou používány k vytváření nosných konstrukcí, protože mají ve srovnání s konstrukční ocelí je jejich poměr pevnosti k měrné hmotnosti zhruba dvojnásobný. [13]

#### Nízká hmotnost

Měrná hmotnost vláknových kompozitů je cca 1,5 krát nižší nežli měrná hmotnost hliníku a cca 4,5 krát menší než měrná hmotnost ocele. Tato vlastnost umožňuje snadnou manipulaci a není zapotřebí zvedací zařízení a také umožňuje sestavení dílčích částí konečné konstrukce mimo a poté je dopravit v celku. [13]

#### Odolnost proti korozi

Kompozity jsou odolné proti atmosférické korozi, ale i proti korozi, která je způsobena chemikáliemi, vodou, bakteriemi, oleji atd. Z tohoto důvodu není zapotřebí jejich povrch opatřovat ochrannými povlaky či nátěry. [13]

#### Tepelné a požární vlastnosti

Kompozity patří mezi reaktoplasty, zvýšení teploty nezpůsobuje jejich tvárnost. Mezi významné vlastnosti patří nízká tepelná vodivost a rozměrová stálost. [13]

#### Elektrické vlastnosti – nevodivost, elektromagnetická transparentnost

Elektrická nevodivost se využívá u míst, kde dochází k manipulaci s elektrickým zařízením, a tím dochází ke zvýšení bezpečnosti. Tato vlastnost se také používá při výrobě elektrických izolátorů, plotů, zábradlí atd. Elektromagnetická transparentnost kompozitů se používá v blízkosti anténních systémů v podobě kompozitních profilů. [13]

### Snadné opracování

Kompozity je možné opracovávat (řezat, brousit, soustružit atd.) běžnými nástroji, které se používají na opracovávání kovů. [13]

#### **1.1.4. Použití kompozitů**

- Automobilový průmysl
- Letecký průmysl
- Stavebnictví
- Chemický průmysl
- Elektrotechnika

## 1.2. Výztuž

Od vyztužující fáze se vyžaduje vysoká pevnost a  $E$ -modul (přibližně o řád vyšší než modul matrice). Vyztužující fáze přenáší převážnou část vnějšího zatížení. Mechanismus pevnostního chování kompozitu je závislý na tvaru, koncentraci a orientaci výztuže. [5]

### 1.2.1. Čedič

Vlákna na bázi tavených hornin představují v současnosti velmi používanou skupinu silikátových materiálů, která našla své uplatnění v řadě průmyslových odvětví. Základem všech těchto výrobků jsou přírodní horniny, které se buď samostatně, nebo spolu s různými korekčními složkami taví. Vzniklá tavenina je zpracovávána rozvlákňováním. [16]

Čedič neboli basalt je přírodní materiál pocházející z nejhojnější výlevné magmatické horniny. Tuto horninu lze nalézt ve většině zemí po celém světě, liší se chemickým složením v závislosti na umístění horniny. Čedič je tmavá hornina vyznačující se šedou až šedo-černou barvou. Charakteristickým znakem čediče je tvorba pětihanných až šestihanných pravidelných sloupců. [10]

Čedičové horniny tají přibližně v rozmezí 1 500 – 1 700 °C. Pokud se čedič dostatečně rychle ochladí, vzniká amorfni sklovitá struktura. Krystalická struktura směsi minerálů vzniká při pomalém chladnutí. Čedičové horniny jsou vhodné pro výrobu vláken, pokud obsahují dva základní minerály. A to olivín ( $2(\text{MgFe}) \text{O SiO}_2$ ) a nefelin ( $\text{Na}_2\text{O Al}_2\text{O}_3 2\text{SiO}_2$ ). [15]



Obr. č. 1.5: Čedičové „varhany“ [16]



Obr. č. 1.6: Detail čedičových sloupců [16]

#### **1.2.1.1. Složení čediče**

Čedič se skládá z několika složek. Nejdůležitějšími chemickými složkami jsou oxid křemičitý  $\text{SiO}_2$ , dále oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), oxid vápenatý ( $\text{CaO}$ ), oxid hořečnatý ( $\text{MgO}$ ), oxid železnatý ( $\text{FeO}$ ) a oxid železitý ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

Oxid křemičitý je v čediči zastoupen přibližně v rozmezí 43,3 – 47 %, oxid hlinitý v rozmezí 11 – 13 %, oxid vápenatý v rozmezí 10 – 12 %, oxid hořečnatý v rozmezí 8 – 11 % a ostatní oxidy mají podíl nižší než 5 %. [10, 15]

Podle obsahu oxidu křemičitého se čediče rozdělují do tří skupin, a to:

- bážické, neboli alkalické čediče (s obsahem  $\text{SiO}_2$  do 42 %),
- slabě kyselé čediče (s obsahem  $\text{SiO}_2$  v rozmezí od 43 – 46 %),
- kyselé čediče (s obsahem  $\text{SiO}_2$  nad 46 %). [15]

Základní hmota čediče je tvořena:

- pyroxeny – augit, titanaugit,
- plagioklasy – labradorit, zbornit,
- olivín.

Pyroxeny tvoří cca 50 % hmotnosti, jsou to metasilikáty, pro které je charakteristická téměř dokonalá štěpnost.

Olivín je minerál s proměnlivým podílem železa a hořčíku. Tento podíl je závislý na podmínkách při vzniku čediče. Olivín tvoří asi 20 % hmotnosti.

Plagioklasy patří mezi živce. Tvoří asi 30 % hmotnosti. [17, 9]

### **1.2.1.2. Výroba čedičových vláken**

Technologie výroby čedičových vláken se liší podle toho, zda jsou vyráběna kontinuální nebo krátká čedičová vlákna.

#### **A. Výroba krátkých čedičových vláken**

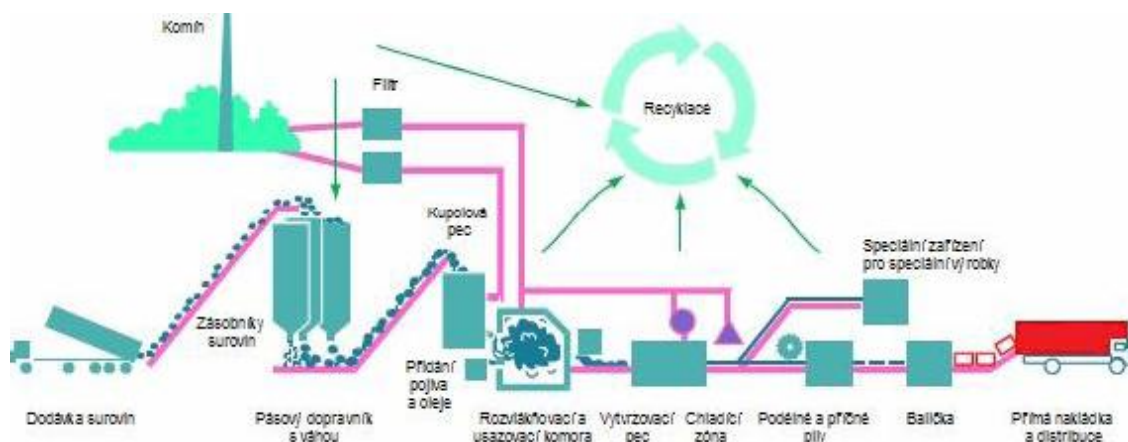
Výroba krátkých čedičových vláken spočívá v tavení čedičové horniny v tzv. kupolové peci při teplotách 1350 – 1450 °C. Tavenina následně vytéká na rotující válce. Vlivem odstředivé síly se změní v kapky a následně se tyto kapky pomocí proudu ofukovacího vzduchu změní v jemné vlákno.

Kapky, které jsou chladnější nelze protáhnout a odletují ve formě drobných zrněk. Zrnka poté padají do spodní části rozvlákňovacího stroje, odkud jsou opět vráceny zpět do pece. Rozvlákněná hmota s malým počtem zrněk je unášena vzduchem do usazovací komory.

V usazovací komoře jsou vlákna ještě zkrápěna vodním roztokem pojiva, vodooodpudivými přísadami, protiplísňovými a dalšími přísadami.

V usazovací komoře se smočená vlákna rovnoměrně usadí do vrstvy, která následně pokračuje do vytvrzovací komory. Tam se za pomoci pojiva a přísad působením tepla vytvrzuje. Ve vytvrzovací komoře dochází k odparu vody a polykondenzaci pojiva. Teplota v komoře je 180 – 220 °C. Z vytvrzovací pece vychází pás kamenné vlny přes přítlačné zařízení, které zajišťuje požadovanou objemovou hmotnost a tloušťku výrobku.

Pás kamenné vlny se pohybuje přes chladicí komoru až k diamantové pile. Tato pila má za úkol zformátovat výrobek ořezem na danou šířku. Ořezané okraje se recyklují, tím, že se vrací do tavicí pece. [9, 20]

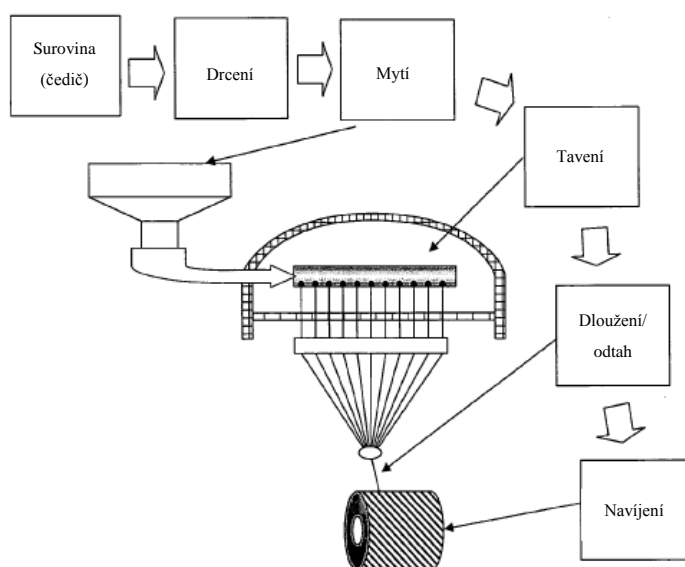


Obr. č. 1.7: Schéma výroby čedičovo – struskového vlákna [23]

## B. Výroba kontinuálních čedičových vláken

Při výrobě kontinuálních čedičových vláken je nutné zvolit teplotu, která se pohybuje cca od 1500 °C do 1700 °C. Čedič je roztaven na požadovanou teplotu a následně protlačována tryskami a dlužena cca při teplotě 1300 °C. Poté dochází k rychlému zchlazení.

Pro výrobu vláken nejsou vhodné všechny čedičové horniny. Jeho chemické složení musí být konstantní s obsahem  $\text{SiO}_2$  cca 46 %. Důležitá je také schopnost tání bez pevných zbytků a tuhnutí bez výrazné krystalizace. [9, 18].



Obr. č. 1.8: Schéma výroby kontinuálních čedičových vláken [19]

### 1.2.1.3. Vlastnosti čedičových vláken

Čedičová vlákna mají mnoho dobrých vlastností, díky kterým je možnost využít je v mnoha oborech. Tato vlákna mají vysokou pevnost, nízkou tažnost. Vlákna jsou nehořlavá, nenasákavá, mají nízkou tepelnou vodivost, vysoký elektrický odpor, dobrou tepelnou odolnost. Jednou z negativních vlastností těchto vláken je jejich křehkost. [21]

Čedičová vlákna předčí svými fyzikálními, mechanickými a chemickými vlastnostmi vlákna skleněná, v tabulce 1.2 jsou uvedeny vlastnosti čedičových a skleněných vláken pro porovnání.

Tab. č. 1.1: Základní provedení čedičových vláken [21]

Sledované hodnoty	Hodnota	Jednotka
Průměr fibril	9 - 12	μm
Základní jemnost nitě	80, 160, ...2500, ...	tex
Průměrná pevnost	0,512	N/tex
Obsah lubrikace	1,0 – 1,5	%
Obsah spalitelných látek	0,69	%
Obsah vlhkosti	0,061	%
Počet zákrutů	0	1/m

Tab. č. 1.2: Porovnání vlastností čedičových a skleněných vláken [21]

Vlastnosti fyzikální	Jednotka	Čedič	Sklo
Hustota (při 20°C)	kg.m <sup>-3</sup>	2900	2600
Navlhavost	%	0,5	1,0
Modul pružnosti v tahu	MPa	100000	70000
Pevnost v tahu	MPa	1850 - 2150	1850 – 2150
Pevnost v tlaku	MPa	300	300
Vlastnosti chemické	Jednotka	Čedič	Sklo
Úbytek hmotnosti při 100 °C za 3 hod.			
v H <sub>2</sub> O	%	99,8	99,3

v 2N HCl	%	81,8	53,9
<b>Vlastnosti tepelné</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Čedič</b>	<b>Sklo</b>
Pracovní teplota	°C	-200 až +800	-60 až +460
Měrná tepelná vodivost	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	0,027 až	0,029 až
<b>Vlastnosti elektrické</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Čedič</b>	<b>Sklo</b>
Specifický odpor	Ω.m	10 <sup>12</sup>	10 <sup>11</sup>

#### 1.2.1.4. Použití čedičových vláken

S využitím čedičových nekonečných vláken a čedičových textilií z nich zhotovených je možno počítat ve všech oblastech, kde se běžně používají skleněná a dříve používala azbestová vlákna. Využití krátkých čedičových vláken se uplatňuje především v podobě tepelněizolační desky pro izolaci šikmých a plochých střech, příček, stropů, stropních podhledů, provětrávaných a kontaktních fasád, sendvičového obvodového zdiva, podlah. Výrobky mohou sloužit také jako technické izolace pro tepelnou a zvukovou izolaci kotlů, pecí, rozvodů tepelných médií, vzduchotechnických zařízení, komínových těles, výfuků.

##### 1.2.1.4.1. Možnosti využití

- plná náhrada skleněných vláken při výrobě tkaniny v perlinkové vazbě pro stavebnictví (omítkové systémy, zalévací hmoty, ...)
- tepelně-izolační směsi ve stavebnictví pro žáruvzdorné stavební hmoty, plniva do tmelů apod.
- výztužné tkaniny v kompozitech a sekaná vlákna v plastických hmotách
- v různých technických výrobcích (rozbrušovací kotouče, lamináty, brzdové destičky, ...)
- izolace tepelné, zvukové a chemické (stavebnictví, letecký průmysl, elektrárny, automobily, ...)



- filtrování agresivních látek, tkaniny a ucpávkové šňůry v chemickém průmyslu (náhrada za azbestopryžové výrobky), horkovzdušná filtrace
- ochranné žáruvzdorné a kyselinovzdorné pracovní oděvy do provozů s velkou tepelnou zátěží a s agresivním chemickým prostředím (tkaniny s hliníkovou fólií v hutích, ocelárnách)
- pro hasiče a svářeče, v chemických provozech, galvanovnách, ...[21]

#### **1.2.1.5. Vliv čedičových vláken na zdraví**

Čedičový materiál je při běžném styku zdravotně nezávadný, je chemicky stálý a je určený pro technické použití. Z čedičového materiálu se samovolně neuvolňují žádné škodlivé látky. Čedičová vlákna nejsou fibrogenní ani karcinogenní.

Při práci s čedičovým materiálem je nutno dodržovat základní hygienické podmínky, může dojít k mechanickému podráždění pokožky, očí a horních cest dýchacích. Při dodržení podmínek je možno se těmito mechanickým účinkům vyhnout. Čedičová vlákna jsou ve formě nekonečných vláken, průměr těchto vláken je 9 - 12  $\mu\text{m}$ , tento průměr se dále neztenčuje ani při jejich zpracování a také se podélně neštěpí. [21]

#### **1.2.1.6. Ekologické přednosti čedičových vláken**

- plnohodnotná náhrada azbestových a skleněných vláken v různých průmyslových aplikacích
- menší zátěž pro životní prostředí při výrobě a likvidaci
- přírodní materiál zpracováván bez dalších přísad
- energeticky méně náročná výroba než výroba skleněných vláken
- v přírodě bohatě se vyskytující nerost ve formě vhodné ke zvlákňování [21]

### **1.3. Matrice**

Základní funkcí matrice je přenos vnějšího zatížení na vyztužující fázi. V porovnání s ní má zpravidla nižší pevnostní vlastnosti a větší plasticitu. Spojuje jednotlivé částicové výztuže, chrání je před vnějšími vlivy a brání rozvoji křehkého porušení. [5]

Nejpoužívanější matricí u kompozitních materiálů s textilní výztuží jsou polymerní matrice. Tyto matrice lze z hlediska tepelných projevů dělit na termoplasty a reaktoplasty (též termosety).

Při výběru vhodné matrice pro konkrétní aplikaci je třeba přihlížet k následujícím vlastnostem:

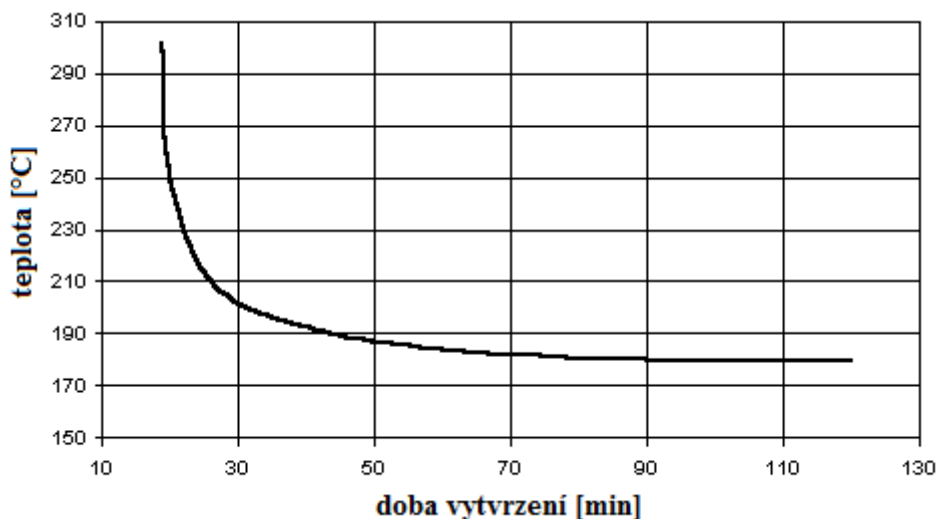
- pevnost
- *E*-modul
- tažnost
- houževnatost
- odolnost proti tečení
- tepelná odolnost
- hořlavost;
- navlhavost;
- odolnost proti UV záření;
- dielektrické vlastnosti;
- chemická odolnost. [7]

### 1.3.1. Lukosil M130

Lukosil M 130 patří mezi metylsilikonový lak, který se používá ve formě roztoku silikonové pryskyřice v xylenovém rozpouštědle. Lak zasychá při pokojové teplotě. Po nanesení a vytvrzení vykazuje řadu vynikajících vlastností, jako jsou:

- odolnost ve velkém rozsahu teplot
- hydrofobní vlastnosti
- separační vlastnosti filmů (plastické hmoty, potraviny)
- odolnost proti povětrnosti a UV záření
- možnost modifikace organických pryskyřic

Lukosil M 130 je možné vytvrdit zvýšením teploty bez použití katalyzátoru. Na grafu je znázorněna doba vytvrzení v závislosti na zvýšení teploty dle obr 4.1.



Obr. č. 1.9: Graf vytvrzování Lukosilu M 130 [23]

Za pokojové teploty je Lukosil M 130 nelepivý, pružný, částečně mechanicky a chemicky poměrně odolný film. Tepelným vytvrzením se dosáhne zvýšení jeho tvrdosti, mechanické a chemické odolnosti a stabilizuje se pro trvalé tepelné namáhání.

Tab. č. 1.3: Základní parametry Lukosil M 130 [23]

Vlastnosti	Jednotky	Hodnoty
Obsah netěkavých látek	%	50±2
Měrná hmotnost	kg.m <sup>-3</sup>	1000 - 1020
Viskozita	mPa.s/20°C	30 - 40
konzistence	při 23°C	24 - 51
Číslo kyselosti	Mg KOH/g	0,02
Třída hořlavosti	-	2
Doba schnutí	hod	max 8
Tepelná odolnost	°C	max 230

#### **1.3.1.1. Uplatnění Lukosilu M 130**

##### Elektrotechnika

Používá se jako pojivo elektroizolačních a tepelně odolných směsí a tmelů a při výrobě elektroizolačních desek. Používá se také jako ochranný nátěr desek tištěných spojů.

##### Průmysl nátěrových hmot

Používá se jako pojivo pro výrobu tepelně odolných nátěrových hmot s použitím do 350°C. Lukosil zasychá v nátěrových hmotách při normální teplotě, což je výhodné u výrobků, které se vytvrzují při vlastním použití.

##### Separální přípravek

Lukosil má výborné separační vlastnosti, a proto je možné ho použít jako mechanicky odolný separační nátěr forem pro odlévání a lisování pryskyřic, plastických hmot a kaučuků. Pro tyto účely je třeba nátěr tepelně vytvrdit. Není nutno používat katalyzátor.

[23, 24]

## **2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST**

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit kompozitní materiál složený z odpadního krátkovlákněného odpadu čediče spojeného pomocí matrice v podobě Lukosilu M130.

Experimentální část je rozdělena do dvou částí. V první části je popsána výroba kompozitních materiálů. Druhá část se zabývá popisem zkoušek, které byly prováděny na vyrobených kompozitech. Dále jsou zde uvedeny přístroje, které byly použity pro testování kompozitů a popis zkoušek.

Na závěr jsou porovnány vlastnosti jednotlivých kompozitů v závislosti na tloušťce materiálu a jeho opětovném nasycení Lukosilem M 130 a vytvrzení v horkovzdušné peci.

### **2.1. Výroba kompozitních vzorků**

Před samotnou výrobou bylo potřeba si připravit materiál a pomůcky. Poté bylo možné začít s výrobou vzorků. Následně bylo zapotřebí připravit vzorky pro testování.

#### **2.1.1. Potřebný materiál a pomůcky**

- čedičová vlákna
- Lukosil M 130



Obr. č. 2.1: Čedičová vlákna



Obr. č. 2.2: Lukosil M 130

Změna mechanických vlastností kompozitních materiálů s krátkovlákněným čedičem vlivem lisování

- kovová deska s vyvrtanými dírami pro stahovací šrouby
- rám formy kovový a papírový
- teflonový papír



Obr. č. 2.3: Kovová deska



Obr. č. 2.4: Rám formy kovový

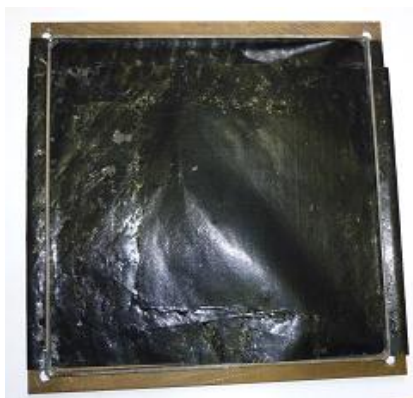
- sítko
- kádinka
- skleněná tyčinka
- horkovzdušná pec – HS 122 A



Obr. č. 2.5.: Horkovzdušná pec – HS 122

### **2.1.2. Postup výroby vzorků pouze přechováním**

Pro výrobu vzorků bylo zapotřebí připravit formu. Tuto formu tvořily dvě kovové desky o tloušťce 2,5 mm s vyvrtanými dírami pro šrouby, rám formy a teflonový papír. Rám formy byl vytvořen svařením čtyř kusů plechu o výšce 10 mm a rozměrech 200 x 200 mm. Na jednu plechovou desku byl položen teflonový papír, aby se kompozit nepřilepil ke kovové desce. Na vytvoření pevných okrajů formy bylo zapotřebí položit na desku s teflonovým papírem čtvercový rám.



Obr. č. 2.6: Forma na plechové desce s teflonovým papírem

Vzorky pro testování jsou tvořeny odpadem z čedičových vláken. Nejprve bylo zapotřebí zbavit čedičová vlákna nečistot. Na pročištění bylo potřeba sítko, přes které byl materiál prosíván, aby z odpadu byly odstraněny nevláknenné zbytky čediče. Poté byl materiál vložen do kádinky, kde byl smíchán spolu s Lukosilem M 130 pomocí skleněné tyčinky. Vzniklá směs byla přechována do formy.



Obr. č. 2.7: Napřechovaná směs ve formě

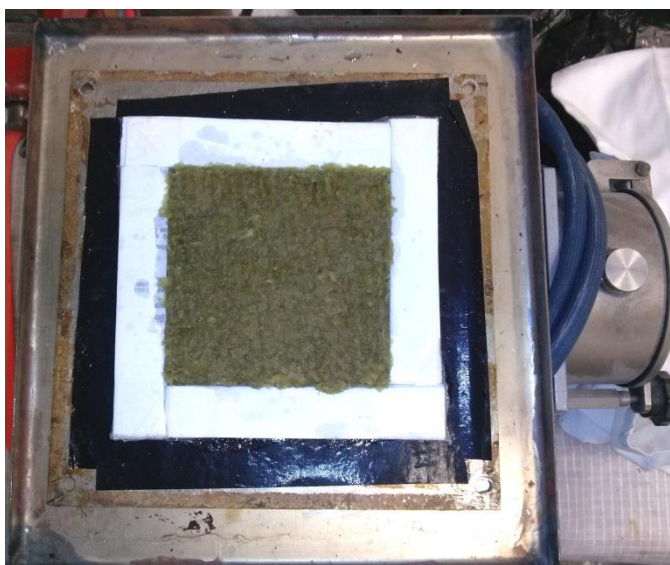
### Změna mechanických vlastností kompozitních materiálů s krátkovlákněným čedičem vlivem lisování

Na napěchovanou směs ve formě byl položen teflonový papír a druhá kovová deska. Forma byla ve všech rozích zajištěna důkladným utažením čtyř šroubů. Důkladné utažení bylo potřeba z toho důvodu, aby forma byla zajištěna, co nejvíce napěchována a vytlačil se přebytečný Lukosil M 130. Takto připravený vzorek byl položen na pečicí papír a vložen do horkovzdušné pece na 200 °C po dobu 6 hodin na vytvrzení.

Po vyndání vytvrzeného vzorku z pece bylo zapotřebí vzorek nechat vychladnout při pokojové teplotě. Po vychladnutí byly odstraněny stahovací šrouby a vzorek byl vyndán. Vzorek se musel vyříznout pomocí pilového listu, protože se připekl ke čtvercové formě. Z tohoto vzorku byla získána kompaktní kompozitní deska.

### **2.1.3. Postup výroby vzorků pýchováním a lisováním**

Pro výrobu vzorků bylo zapotřebí připravit formu. Tuto formu tvořily dvě kovové desky o tloušťce 2,5 mm, rám formy a teflonový papír. Rám formy byl vytvořen z papíru o výšce 15 mm a rozměrech 150 x 150 mm. Na jednu plechovou desku byl položen teflonový papír, aby se kompozit nepřilepil ke kovové desce. Na vytvoření okrajů formy bylo zapotřebí položit na desku s teflonovým papírem čtvercový papírový rám.



Obr. č. 2.8: Napěchovaná směs v papírovém rámečku pro lisování



Změna mechanických vlastností kompozitních materiálů s krátkovlákněným čedičem vlivem lisování

Materiál byl napěchován do rámečku a na tuto napěchovanou směs byl položen teflonový papír a druhá kovová deska. Následně byl takto připravený vzorek zalisován silou 25 kN a současně vytvrzen na lisu po dobu 2 hodin a teplotě 200 °C.

Po vyndání vytvrzeného vzorku z lisu bylo zapotřebí vzorek nechat vychladnout při pokojové teplotě. Po vychladnutí byl vzorek vyndán. Z tohoto vzorku byla získána kompaktní kompozitní deska.

Lis na obr. č. 2.9 pro přípravu kompozitních vzorků je určen pro laboratorní práce. Lis pracuje se spodním lisováním s maximální regulovatelnou silou 50 kN. Topné desky o rozměrech 400 x 400 mm jsou vytápěny topnými patronami o příkonu 3 kW/desku. Teplota je regulovatelná do 250 °C. Nastavení parametrů lisovacího cyklu se provádí na dotykové obrazovce, která je spojena s řídicím PLC Siemens S7.



Obr. č. 2.9: Hydraulický vyhřívaný lis HVL 50

#### **2.1.4. Příprava vzorků pro měření**

Pro měření na stroji DMA byly připraveny z desky vzorky několika typů, vždy přibližně o stejné délce a šířce 50 x 10 mm. Jediný rozdíl ve vzorcích byla výška, která byla stanovena na 2,5; 5 a 7,5 mm (obr. č. 2.10). Vzorky z desky byly vyrobeny pomocí strojové pily a následným ofrézováním na určitý rozměr vzorku. Materiál se řezal bez větších problémů. U frézování byly zapotřebí nastavit vyšší otáčky, aby se materiál nelepil na frézu.

Takto připravené vzorky byly ještě jednou nasyceny Lukosilem M130 a následně vytvrzeny a to tak, že byly ponořeny do Lukosilu M 130 a opětovně vloženy do horkovzdušné pece na 200 °C po dobu 6 hodin na vytvrzení.



Obr. č. 2.10: Ukázka vzorků připravených pro měření

## **2.2. Hodnocení vlastností kompozitních materiálů**

Pro experiment byly stanoveny dva měřicí přístroje. Prvním měřicím přístroj DMA DX04T, který je umístěn v laboratoři KMI. Zvolená zkouška byla destruktivního charakteru. Jsou zde měřeny dynamicko – mechanické vlastnosti vyrobeného kompozitního materiálu z krátkovlákněného čediče a Lukosilu M130 jako matrice. Na přístroji byly testovány vzorky o různých tloušťkách. Naměřené hodnoty jsou zde porovnány z hlediska vlivu opětovného nasycení povrchu Lukosilem M130 a druhu výroby.

Druhým testem pro hodnocení vlastností kompozitních materiálů byl zvolen Charpy test. Pomocí tohoto testu je získána hodnota rázové houževnatosti materiálů.

### **2.2.1. 3 – Point bending na dynamicko – mechanické analýze**

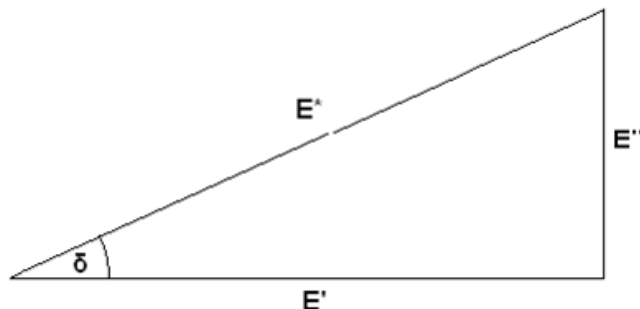
Dynamicko - mechanická analýza (DMA) slouží k získání charakteristických vlastností pevných látek, která je založena na vyhodnocování dynamicko - mechanických spekter pro jednotlivé materiály specifických vlastností (jsou funkcí specifického relaxačního procesu spojeného s určitým druhem molekulárního pohybu). Tato dynamická spektra se měří jako funkce frekvence, času, napětí nebo kombinace těchto parametrů. [27]

DMA je jedna z nejcitlivějších a nejpřesnějších technik schopná charakterizovat a interpretovat mechanické chování materiálu. Podstata metody DMA je založena na sledování viskoelastické odezvy materiálu podrobeného malému oscilačnímu napětí. Metoda umožňuje oddělit viskoelastickou odezvu materiálu na dvě komponenty modulu ( $E^*$ ): reálná část, která reprezentuje elastický modul ( $E'$ ) a imaginární část, která představuje útlumovou nebo viskozitní složku ( $E''$ ). Celkový tzv. komplexní modul je  $E^* = E' + iE''$ . Tato separace měření do dvou komponent popisuje dva nezávislé procesy uvnitř materiálu: elasticitu (vratná složka) a viskozitu (ztrátová, disipační energie). To je základní princip DMA, který ji charakterizuje na rozdíl do ostatních metod testování mechanických vlastností látek. [22]

Komplexní modul pružnosti se vypočítá dle vztahu:

$$E^* = E' + iE'' \quad (2.1)$$

kde  $E'$  je reálná část, která reprezentuje elastický modul a  $E''$  je imaginární část, která představuje útlumovou nebo viskozitní složku.



Obr. č. 2.11: Rozklad absolutní hodnoty komplexního modulu [22]

DMA může charakterizovat materiály závislostí modulu a ztrátového úhlu na teplotě (případně na čase, frekvenci). Tím poskytuje údaje o mechanických vlastnostech, které mají přímý vztah ke zpracování a užitným vlastnostem výrobků. DMA se zpravidla používá k identifikaci sekundárních přechodů v polymerních materiálech, ale je schopna zaznamenat i řadu dalších méně intenzivních přechodů. DMA je založena na principu jak mechanických, tak dynamických a tepelných odezev zkoumaného materiálu.

Přístroj DMA DX04T umožňuje měřit celý průběh skutečné síly působící na vzorek a celý průběh deformace vzorku, z těchto hodnot následně vypočítat mnoho údajů, například obě složky komplexního modulu  $E'$ ,  $E''$  z jejich průběhů ztrátový činitel  $\tan \delta$ . Ztrátový činitel se vypočítá  $\tan \delta = E''/E'$ . Na rozdíl od přístrojů jiných firem (jak uvádí firma R. M. I.) je přístroj schopen zobrazovat hysterezní křivku, ze které lze zjistit energetické ztráty v materiálu.

Ztrátový činitel se vypočítá dle vztahu:

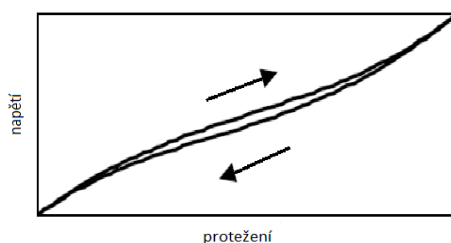
$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (2.2)$$

kde  $E'$  je reálná část, která reprezentuje elastický modul a  $E''$  je imaginární část, která představuje útlumovou nebo viskozitní složku.

### Hysterezní křivka

Vlákna jsou schopna ve větší nebo menší míře vracet se po deformaci do původních rozměrů a původního tvaru. Cyklickým zatěžováním a odlehčováním vláken zůstává určitá deformace vláken trvalá. Dalším zatěžováním neprobíhá proces deformace vlákna stejně a po uvolnění napětí se vlákno nevrací zpět do původního stavu. Dokonale elastické vlákno by se vracelo stejnou cestou do původního stavu a do původních rozměrů. U nedokonale pružných vláken se uvolňuje jen část energie vložené do vlákna při deformaci.

Křivky napětí-tažnost jsou při zatěžování vlákna odlišné od křivek napětí-tažnost při uvolňování napětí a vzniká hysterezní smyčka (obr. 2.12). Plocha smyčky hystereze udává rozdíl v množství spotřebované a navrácené energie. Čím je plocha smyčky větší, tím více energie zůstává po deformaci ve vzorku. Energie se mění na teplo.



Obr. č. 2.12: Hysterezní křivka [27]

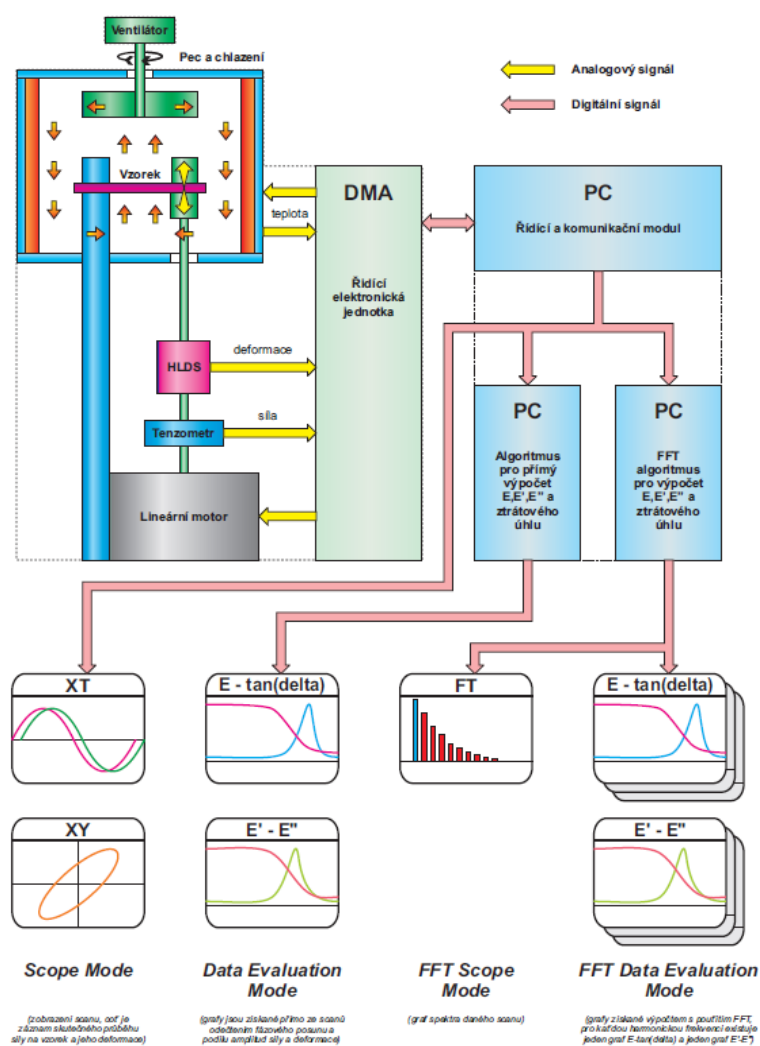
Přístroj je plně řízen standardním PC. Pro tvorbu grafů a vyhodnocení dynamicko - mechanické analýzy je používán program DMA Grapher. Dynamicko - mechanický analyzátor DMA DX04T umožňuje současnou aplikaci dvou různých metod k určení průběhu modulu a ztrátového úhlu.

První metoda je přímé určení modulu z amplitudy kladné a záporné půlvlny síly a deformace (získáme dvě křivky modulu -  $E_{UP}$ ,  $E_{DN}$ ) a určení ztrátového úhlu z fázového posunu mezi náběžnými a sestupnými hranami průběhů síly a deformace (získáme opět dvě křivky ztrátového úhlu  $tg\delta_{UP}$ ,  $tg\delta_{DN}$ ), přičemž příslušné dvojice křivek v případě správného měření splývají.

### Změna mechanických vlastností kompozitních materiálů s krátkovlákněným čedičem vlivem lisování

Druhá metoda je založena na zcela odlišném principu - data se zpracují pomocí FFT (Fast Fourier Transform) a výsledkem je průběh modulu a ztrátového úhlu v závislosti na teplotě nebo na čase pro každou harmonickou složku. Porovnání výsledků obou metod již v průběhu měření dává perfektní možnost rychlé a snadné kontroly správnosti měření. [27]

Základem přístroje jsou dvě vyvážená rovnoběžná ramena, uložená na speciálních čepech, umístěných blízko středu ramen. Čepy jsou vysoce přesné torzní pružiny. Mezi ramena se upíná vzorek, který vytváří rezonanční systém tj. rezonanční frekvence závislá na modulu a geometrii vzorku. Celé zařízení je umístěno v termostátovaném prostředí, což umožňuje jak izotermní měření tak měření při změně teploty, obvykle od - 150 °C až 500 °C.



Obr. č. 2.13: Blokové schéma DMA DX04T [27]

- **Postup měření pro čelist na 3 - bodový ohyb:**

Vzorky o délce 100 mm musely být zkráceny zhruba na 48 mm z důvodu konstrukce přiklápěcí pícky a činné délce čelisti. Při tomto průběhu měření se zadávaly tyto hodnoty:

- rozměry vzorku (činná délka ( $l$ ), šířka ( $b$ ) a výška ( $h$ )),
- frekvence byla zvolena na 5 Hz,
- teplota – cca 25 °C (přibližně pokojová teplota),
- maximální deformační amplituda (byla zvolena 0,4 mm).

Po zadání všech údajů do počítače byl vzorek vložen do čelistí a zakryt píckou aby mohl být stroj spuštěn. U čelisti musely být použity speciální podložky pro zvýšení rámu čelisti. Bez těchto speciálních podložek stroj z konstrukčních důvodů neměřil, jednalo se především o vzorky o výškách 5 a 7,5 mm. Toto platilo pro vzorky jednou vytvrzené i s opětovným vytvrzením.

K vypracování experimentu byly zvoleny čelisti pro 3 – bodový ohyb zobrazené na obr. č. 2.14.



Obr. č. 2.14: přípravek pro 3 – bodový ohyb

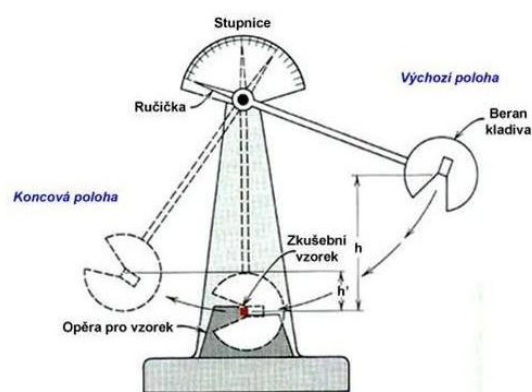


### 2.2.2. Charpy test

Rázová zkouška ohybem metodou Charpyho je dobrým ukazatelem houževnatosti (celkové odolnosti materiálu vůči deformaci) nebo naopak křehkosti materiálů. Je to zkouška dynamická. To znamená, že síla působící na vzorek roste z nulové hodnoty na hodnotu maximální ve velmi krátkém čase. Zkouška je vhodná jako simulace nárazů různých charakterů. [5]



Obr. č. 2.15: Charpyho kladivo LabTest ®  
CHK 50J [28]



Obr. č. 2.16: Schema Charpyho kladivo [29]

- **Postup zkoušky**

Zkušební vzorek má délku 77 mm, šířku 10 mm a průměrnou tloušťku 2,5; 5; 7,5 mm. V příslušné normě nejsou rozměry vzorků specifikované, vyjma jejich tloušťky. Při testování zkušebních vzorků v rovnoběžném směru musí být rozměrem tělesa, který je kolmý na směr rázu, tloušťka desky, ze které byl zkušební vzorek zhotoven. Délka vzorku je určena neměnnou vzdáleností podpěr na zkušebním přístroji (norma doporučuje pro tenké desky poměr rozpětí podpěr a tloušťky vzorku 8 mm), šířka je zachována stejná jako u vzorků určených pro testování na jiných přístrojích. [26]

Kladivo, otočné kolem osy, se zdvihne a upevní v počáteční poloze. V nejnižší poloze kladiva je vodorovně na podpěrách umístěn zkušební vzorek. Po uvolnění z počáteční



Změna mechanických vlastností kompozitních materiálů s krátkovlákněným čedičem vlivem lisování  
polohy se kladivo pohybuje rychlostí asi 3,7 m/s po kruhové dráze a rovnoběžně na užší stranu narazí na zkoušený materiál. Hodnotí se, kolik práce (energie) je potřeba k porušení vzorku. U kompozitních materiálů nárazová energie potřebná na porušení vzorku závisí na materiálu matrice, druhu vláknové výztuže, jejím objemovém množství a na orientaci vláken vzhledem k působišti síly. [5, 25]

Rázová houževnatost  $a_{cU}$  se vypočítá ze vztahu:

$$a_{cU} = \frac{E_c}{bh} \quad (2.3)$$

kde  $E_c$  [J] je energie, kterou kladivo narazí na vzorek,  $b$  [mm] je šířka vzorku a  $h$  [mm] je tloušťka vzorku. [26]

### 2.2.3. Objemová měrná hmotnost

Pro stanovení objemové měrné hmotnosti drobných tělísek se používá pyknometrická metoda. Pyknometr je baňka se zabroušenou zátkou, v níž je kapilární otvor. Přesný objem kapaliny je v pyknometru obsažen tehdy, je-li pyknometr uzavřen zátkou a odtekla-li přebytečná kapalina kapilárou. Pyknometrem lze vymezit objem kapaliny s přesností přibližně na 0,01 %.

Objem tělísek stanovíme z hmotnosti kapaliny, která z pyknometru vyteče, vložíme-li do něho měřená tělíska. Za kapalinu pro měření volíme nejčastěji destilovanou vodu. Objemovou měrnou hmotnost tělísek potom zjišťujeme trojím vážením, tj. zvážíme pyknometr naplněný destilovanou vodou ( $m_1$ ). Dále zvážíme pyknometr naplněný destilovanou vodou a vedle pyknometru umístíme na misku také tělíska ( $m_2$ ). Nakonec vložíme do pyknometru s vodou tělíska a opět zvážíme ( $m_3$ ).

Hmotnost tělísek je:

$$m = m_2 - m_1 \quad (2.4)$$

Hmotnost vytlačené kapaliny z pyknometru:

$$m_k = m_2 - m_3 \quad (2.5)$$

Objemová měrná hmotnost tělísek je:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{m_2 - m_3} (\rho_k - \rho_{vz}) + \rho_{vz} \quad (2.6)$$

kde  $\rho_k$  je objemová měrná hmotnost destilované vody za dané teploty,  $\rho_{vz}$  je objemová měrná hmotnost vzduchu za dané teploty a tlaku.

## 2.3. Diskuze výsledků

Tabulky jsou rozděleny do čtyř oddílů. Každý oddíl je označen písmenky **A**, **B**, **C** a **D**. Oddíl **A** označuje vzorky nasycené a vytvrzené pouze jednou. Oddíl **B** označuje vzorky s opětovným nasycením a vytvrzením. Oddíl **C** označuje vzorky tvrzené pouze jednou při lisování. Oddíl **D** označuje vzorky tvrzené při lisování s opětovným nasycením a vytvrzením.

### 2.3.1. Objemová měrná hmotnost kompozitních vzorků

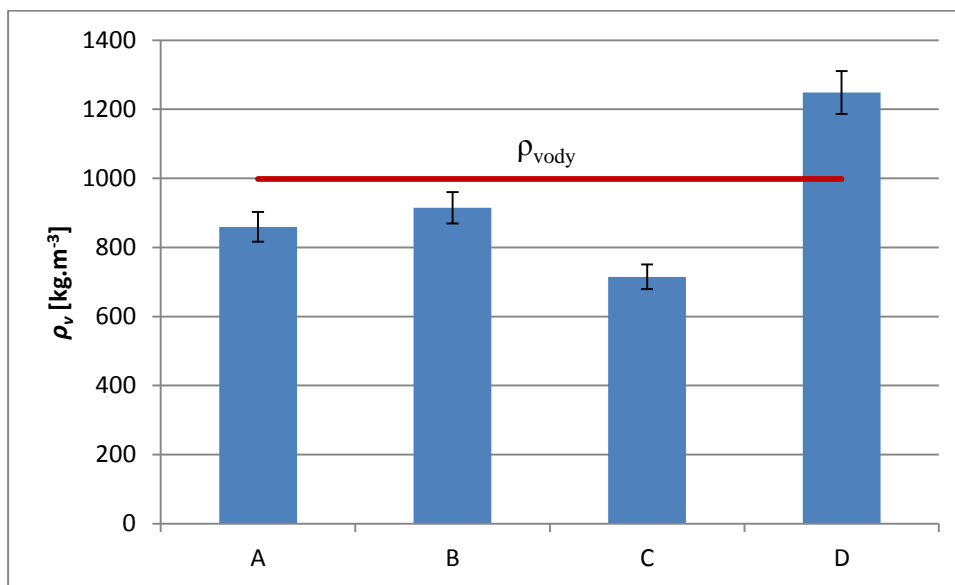
Pro měření objemové měrné hmotnosti byla použita pyknometrická metoda. Z naměřených hodnot byly vypočteny průměrné hodnoty, ze kterých byla vypočítána objemová měrná hmotnost testovaného kompozitu, která je znázorněna v tabulce č. 2.1.

Tab. č. 2.1: Průměrná objemová měrná hmotnost [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

Typ	voda	vzorek	vzorek ve vodě	kompozit
	$m$ [g]	$m$ [g]	$m$ [g]	$\rho_v$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
<b>A</b>	42,9722	0,5043	42,8879	859,6
<b>B</b>	42,9722	0,5614	42,9206	914,7
<b>C</b>	42,9722	0,5642	42,7426	714,8
<b>D</b>	42,9722	0,6177	43,0968	1248,5

Změna mechanických vlastností kompozitních materiálů s krátkovlákněm čedičem vlivem lisování

Na obr. č. 2.17 je znázorněn graf objemové měrné hmotnosti kompozitu. Z grafu je patrné, že nejvyšší objemovou měrnou hmotnost dosáhly vzorky tvrzené při lisování s opětovným nasycením a vytvrzením. Tyto vzorky mají jako jediné vyšší objemovou měrnou hmotnost než voda. Na základě tohoto zjištění můžeme usoudit, že došlo k největšímu zaplnění vzduchových pórů v kompozitu.



Obr. č. 2.17: Graf objemové měrné hmotnosti

### 2.3.2. Modul pružnosti měřený na DMA DX04T

Následující tabulky č. 2.2; 2.3 a 2.4 zobrazují naměřené hodnoty kompozitů na přístroji DMA. Tyto hodnoty byly měřeny po dobu 30 minut při pokojové teplotě cca 24 °C a byla stanovena frekvence 5 Hz a amplituda 0,4 mm pro měření. Při této frekvenci a amplitudě bylo dosaženo nejpřesnějších naměřených hodnot.

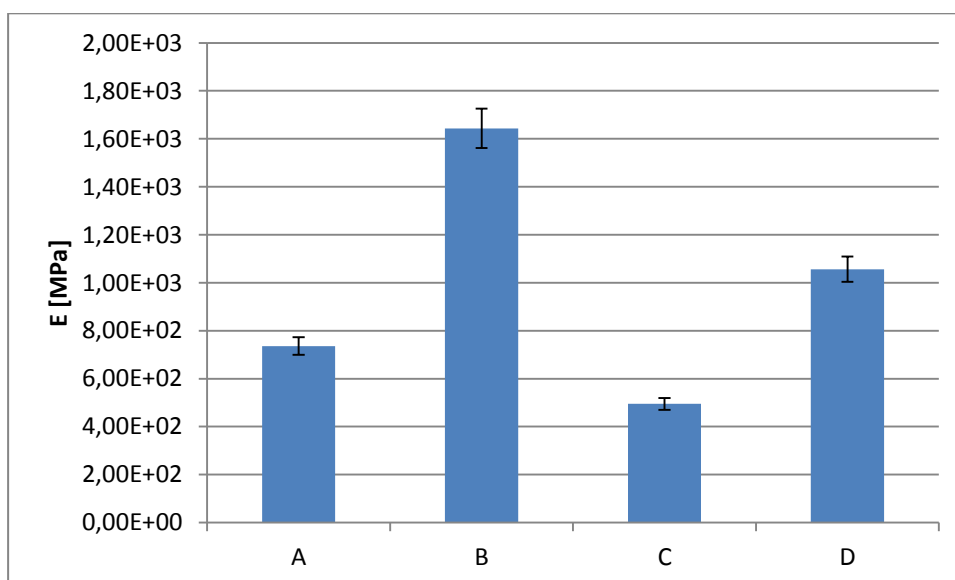
Tab. č. 2.2: Vzorčky s výškou 2,5 mm

Typ	amplituda	reálný modul pružnosti	imaginární modul pružnosti	komplexní modul pružnosti	ztrátový činitel
	$\lambda$ [mm]	$E'$ [MPa]	$E''$ [MPa]	$E$ [MPa]	$\tan \delta$ [-]
A	0,40	8,38E+02	4,11E+01	8,39E+02	4,91E-02
	0,40	7,23E+02	1,73E+01	7,24E+02	2,39E-02
	0,40	6,45E+02	1,63E+01	6,45E+02	2,52E-02
	Průměrné hodnoty	<b>7,35E+02</b>	<b>2,49E+01</b>	<b>7,36E+02</b>	<b>3,27E-02</b>
B	0,40	1,58E+03	5,58E+01	1,58E+03	3,53E-02
	0,40	1,82E+03	6,41E+01	1,82E+03	3,52E-02
	0,40	1,53E+03	1,28E+01	1,53E+03	8,33E-02
	Průměrné hodnoty	<b>1,64E+03</b>	<b>4,42E+01</b>	<b>1,64E+03</b>	<b>5,13E-02</b>
C	0,40	3,29E+02	4,97E+00	3,29E+02	1,51E-02
	0,40	6,25E+02	7,64E+00	6,25E+02	1,22E-02
	0,40	5,30E+02	3,32E+01	5,31E+02	6,27E-02
	Průměrné hodnoty	<b>4,95E+02</b>	<b>1,53E+01</b>	<b>4,95E+02</b>	<b>3,00E-02</b>
D	0,40	1,13E+03	6,18E+01	1,13E+03	5,48E-02
	0,40	1,01E+03	4,60E+01	1,01E+03	4,57E-02
	0,40	1,03E+03	3,04E+01	1,03E+03	2,94E-02
	Průměrné hodnoty	<b>1,06E+03</b>	<b>4,61E+01</b>	<b>1,06E+03</b>	<b>4,33E-02</b>

Změna mechanických vlastností kompozitních materiálů s krátkovlákněným čedičem vlivem lisování

Na obr. č. 2.18 je znázorněn graf závislosti komplexního modulu pružnosti  $E$  [MPa] na způsobu výroby kompozitů s výškou 2,5 mm. Z tohoto grafu vyplývá, že vyšších hodnot dosahují kompozity opětovně nasycené a vytvrzené jak u vzorků vyrobených pouze přechováním, tak u vzorků vyrobených přechováním a následným lisováním na hydraulickém lisu.

Z grafu je patrné, že u kompozitů jednou nasycených a vytvrzených dojde po druhém vytvrzení k dvojnásobnému nárůstu modulu pružnosti  $E$  [MPa]. U kompozitů s výškou 2,5 mm má větší vliv opětovné vytvrzení a nasycení než-li způsob výroby.

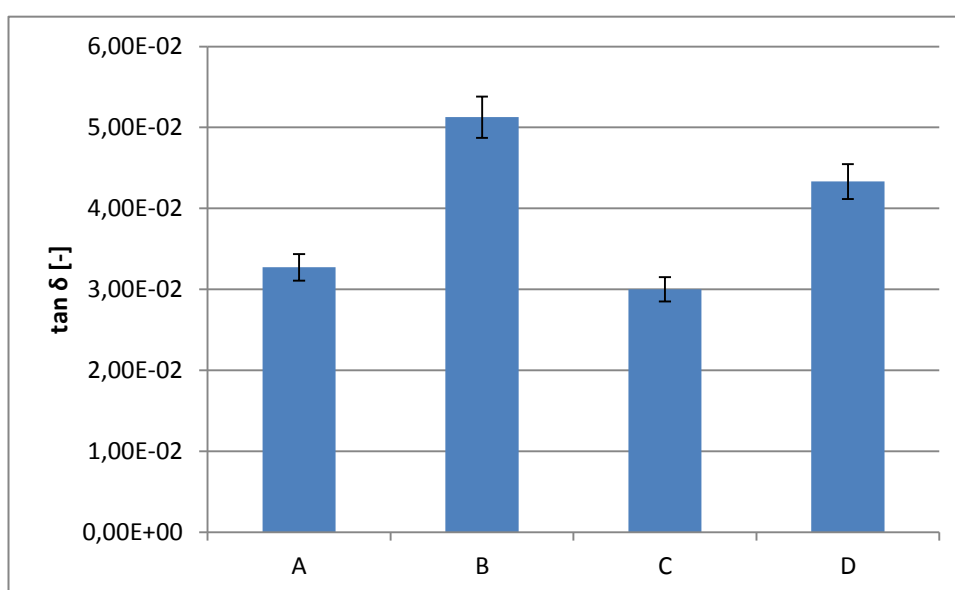


Obr. č. 2.18: Graf závislosti komplexního modulu pružnosti  $E$  [MPa] na způsobu výroby kompozitů s výškou 2,5 mm

Změna mechanických vlastností kompozitních materiálů s krátkovlákněným čedičem vlivem lisování

Na obr. č. 2.19 je znázorněn graf závislosti ztrátového úhlu  $\tan \delta$  [-] na způsobu výroby kompozitů s výškou 2,5 mm. Nejvyšší naměřené hodnoty dosáhl kompozit opětovně nasycený a vytvrzený vyrobený pouze přechováním (B).

Z tohoto grafu vyplývá, že vyšších hodnot dosahují kompozity opětovně nasycené a vytvrzené jak u vzorků vyrobených pouze přechováním, tak u vzorků vyrobených přechováním a následným lisováním na hydraulickém lisu.



Obr. č. 2.19: Graf závislosti ztrátového úhlu  $\tan \delta$  [-] na způsobu výroby kompozitů s výškou 2,5 mm

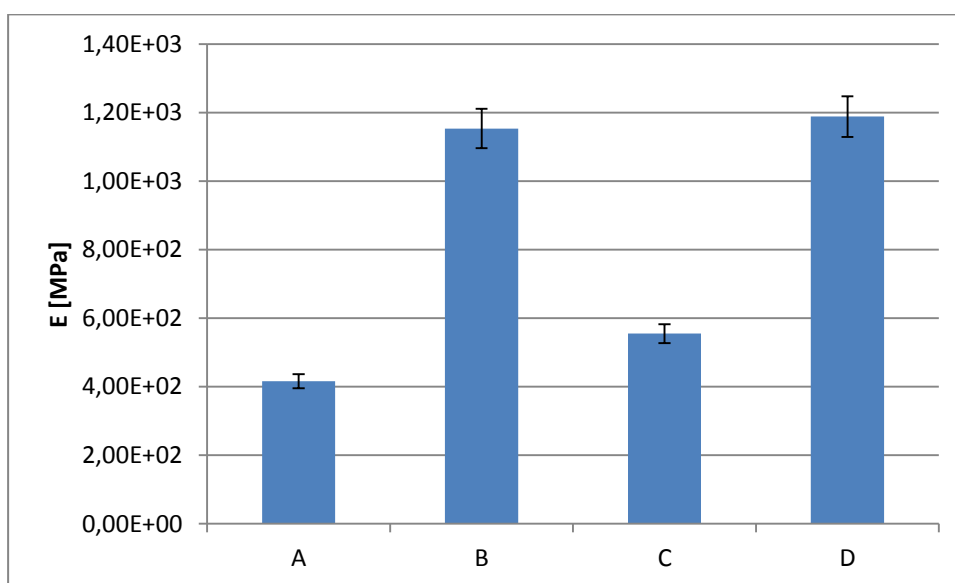
Tab. č. 2.3: Vzorky s výškou 5 mm

Typ	amplituda	reálný modul pružnosti	imaginární modul pružnosti	komplexní modul pružnosti	ztrátový činitel
	$\lambda$ [mm]	$E'$ [MPa]	$E''$ [MPa]	$E$ [MPa]	$\tan \delta$ [-]
A	0,40	4,76E+02	2,66E+01	4,77E+02	5,56E-02
	0,40	3,79E+02	2,78E+01	3,80E+02	7,32E-02
	0,40	3,90E+02	2,54E+01	3,91E+02	6,51E-02
	Průměrné hodnoty	4,15E+02	2,66E+01	4,16E+02	6,46E-02
B	0,40	1,23E+03	1,56E+01	1,23E+03	1,26E-02
	0,40	1,03E+03	3,87E+01	1,03E+03	3,77E-02
	0,40	1,20E+03	2,80E+01	1,20E+03	2,33E-02
	Průměrné hodnoty	1,15E+03	2,74E+01	1,15E+03	2,45E-02
C	0,40	4,16E+02	2,52E+01	4,17E+02	6,06E-02
	0,40	6,80E+02	5,71E+01	6,83E+02	8,40E-02
	0,40	5,63E+02	3,66E+01	5,65E+02	6,49E-02
	Průměrné hodnoty	5,53E+02	3,97E+01	5,55E+02	6,98E-02
D	0,40	1,29E+03	2,95E+01	1,29E+03	2,29E-02
	0,40	1,02E+03	4,28E+01	1,02E+03	4,21E-02
	0,40	1,26E+03	2,08E+01	1,26E+03	1,65E-02
	Průměrné hodnoty	1,19E+03	3,10E+01	1,19E+03	2,72E-02



Na obr. č. 2.20 je znázorněn graf závislosti komplexního modulu pružnosti  $E$  [MPa] na způsobu výroby kompozitů s výškou 5 mm. Z tohoto grafu vyplývá, že vyšších hodnot dosahují kompozity opětovně nasycené a vytvrzené jak u vzorků vyrobených pouze přechováním, tak u vzorků vyrobených přechováním a následným lisováním na hydraulickém lisu.

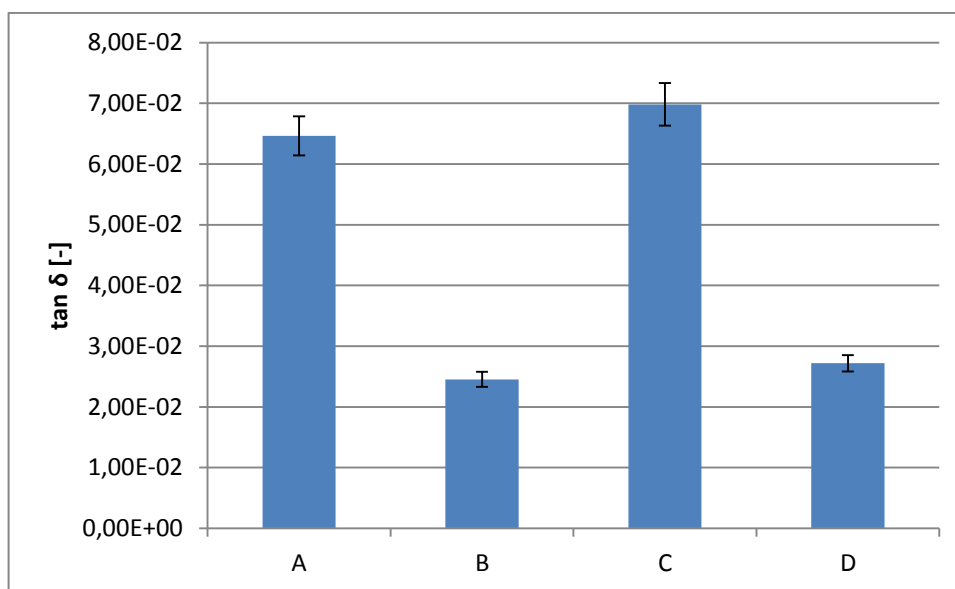
Z grafu je patrné, že u kompozitů jednou nasycených a vytvrzených dojde po druhém vytvrzení k trojnásobnému nárůstu komplexního modulu pružnosti  $E$  [MPa]. U kompozitů jednou nasycených a vytvrzených dojde po druhém vytvrzení a lisování na hydraulickém lisu k dvojnásobnému nárůstu modulu pružnosti  $E$  [MPa]. Kompozity vyrobené lisováním na hydraulickém lisu dosahují vyšších hodnot než kompozity vyrobené bez lisování. U kompozitů s výškou 5 mm má větší vliv opětovné vytvrzení a nasycení než-li způsob výroby.



Obr. č. 2.20: Graf závislosti komplexního modulu pružnosti  $E$  [MPa] na způsobu výroby kompozitů s výškou 5 mm

Na obr. č. 2.21 je znázorněn graf závislosti ztrátového úhlu  $\tan \delta$  [-] na způsobu výroby kompozitů s výškou 5 mm. Nejvyšší naměřené hodnoty dosáhl kompozit jednou nasycený a vytvrzený vyrobený pēchováním a následným lisováním na hydraulickém lisu (C).

Z tohoto grafu vyplývá, že vyšších hodnot dosahují kompozity jednou nasycené a vytvrzené jak u vzorků vyrobených pouze pēchováním, tak u vzorků vyrobených pēchováním a následným lisováním na hydraulickém lisu.



Obr. č. 2.21: Graf závislosti ztrátového úhlu  $\tan \delta$  [-] na způsobu výroby kompozitů s výškou 5 mm

Tab. č. 2.4: Vzorky s výškou 7,5 mm

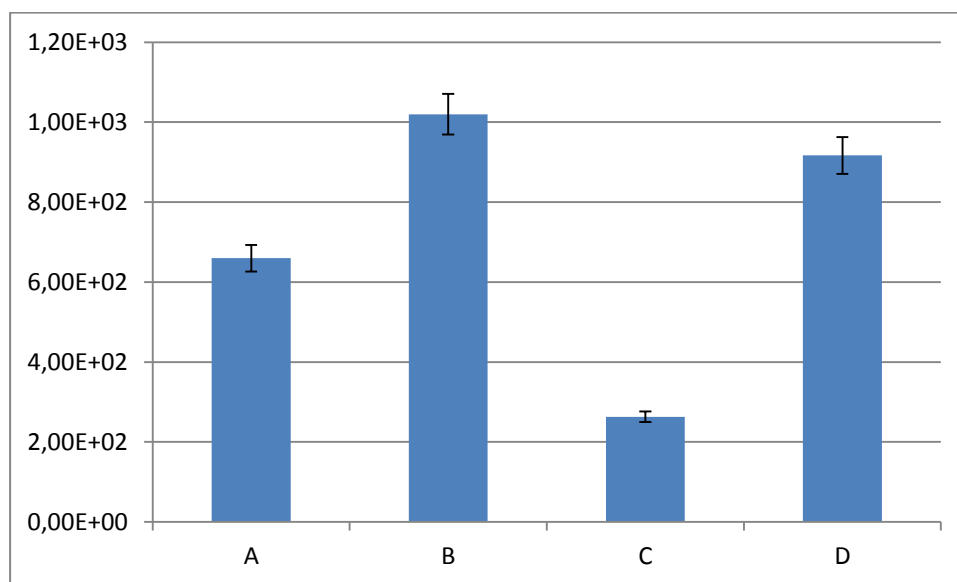
Typ	amplituda	reálný modul pružnosti	imaginární modul pružnosti	komplexní modul pružnosti	ztrátový činitel
	$\lambda$ [mm]	$E'$ [MPa]	$E''$ [MPa]	$E$ [MPa]	$\tan \delta$ [-]
A	0,40	5,68E+02	2,63E+01	5,69E+02	4,63E-02
	0,40	7,25E+02	4,60E+00	7,25E+02	6,36E-03
	0,40	6,85E+02	1,36E+01	6,85E+02	1,98E-02
	Průměrné hodnoty	6,59E+02	1,48E+01	6,60E+02	2,42E-02
B	0,40	8,99E+02	1,16E+01	8,99E+02	1,29E-02
	0,40	1,13E+03	1,67E+01	1,13E+03	1,48E-02
	0,40	1,03E+03	1,34E+01	1,03E+03	1,30E-02
	Průměrné hodnoty	1,02E+03	1,39E+01	1,02E+03	1,36E-02
C	0,40	2,51E+02	2,12E+01	2,52E+02	8,45E-02
	0,40	2,39E+02	1,30E+01	2,39E+02	5,45E-02
	0,40	2,98E+02	2,00E+01	2,98E+02	6,71E-02
	Průměrné hodnoty	2,62E+02	1,81E+01	2,63E+02	6,87E-02
D	0,40	8,33E+02	5,27E+00	8,33E+02	6,32E-03
	0,40	1,00E+03	2,16E-01	1,00E+03	2,16E-03
	0,40	9,13E+02	2,54E+01	9,14E+02	2,79E-02
	Průměrné hodnoty	9,17E+02	1,03E+01	9,17E+02	1,21E-02

Změna mechanických vlastností kompozitních materiálů s krátkovlákněným čedičem vlivem lisování

Na obr. č. 2.22 je znázorněn graf závislosti komplexního modulu pružnosti  $E$  [MPa] na způsobu výroby kompozitů s výškou 7,5 mm. Z tohoto grafu vyplývá, že vyšších hodnot dosahují kompozity opětovně nasycené a vytvrzené jak u vzorků vyrobených pouze přechováním, tak u vzorků vyrobených přechováním a následným lisováním na hydraulickém lisu.

Z grafu je patrné, že u kompozitů jednou nasycených a vytvrzených dojde po druhém vytvrzení k 1,5 násobnému nárůstu modulu pružnosti  $E$  [MPa]. U kompozitů jednou nasycených a vytvrzených dojde po druhém vytvrzení a lisování na hydraulickém lisu k 3,5 násobnému nárůstu modulu pružnosti  $E$  [MPa]. Kompozity vyrobené lisováním na hydraulickém lisu dosahují nižších hodnot než kompozity vyrobené bez lisování.

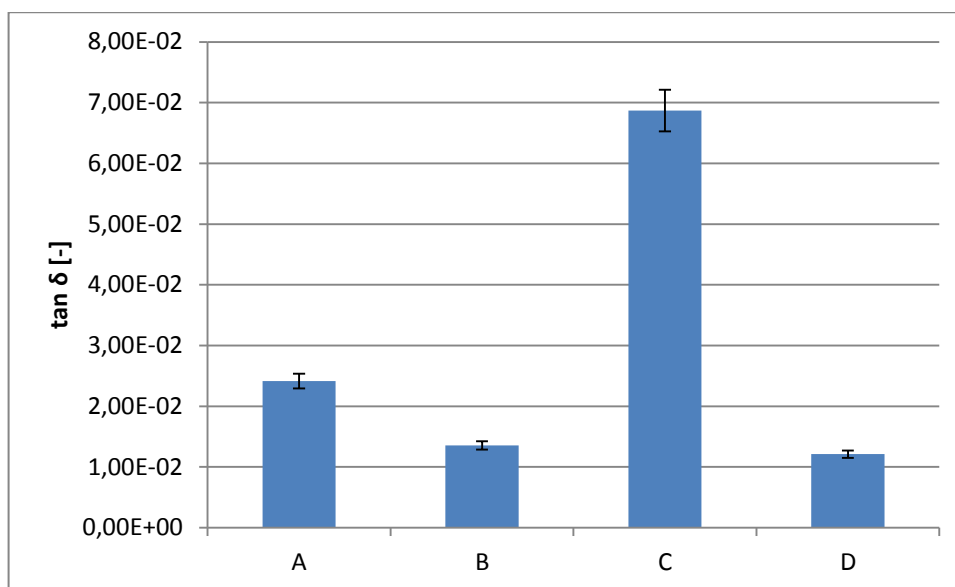
U kompozitů s výškou 7,5 mm má větší vliv opětovné vytvrzení a nasycení než-li způsob výroby a u této výšky kompozitu má opětovné nasycení a vytvrzení lisovaného vzorku na hydraulickém lisu výrazně větší účinek na růstu modulu pružnosti.



Obr. č. 2.22: Graf závislosti komplexního modulu pružnosti  $E$  [MPa] na způsobu výroby kompozitů s výškou 7,5 mm

Změna mechanických vlastností kompozitních materiálů s krátkovlákněným čedičem vlivem lisování

Na obr. č. 2.23 je znázorněn graf závislosti ztrátového úhlu  $\tan \delta$  [-] na způsobu výroby kompozitů s výškou 7,5 mm. Nejvyšší naměřené hodnoty dosáhl kompozit jednou nasycený a vytvrzený vyrobený přechováním a následným lisováním na hydraulickém lisu (C).



Obr. č. 2.23: Graf závislosti ztrátového úhlu  $\tan \delta$  [-] na způsobu výroby kompozitů s výškou 7,5 mm

### 2.3.3. Rázová houževnatost

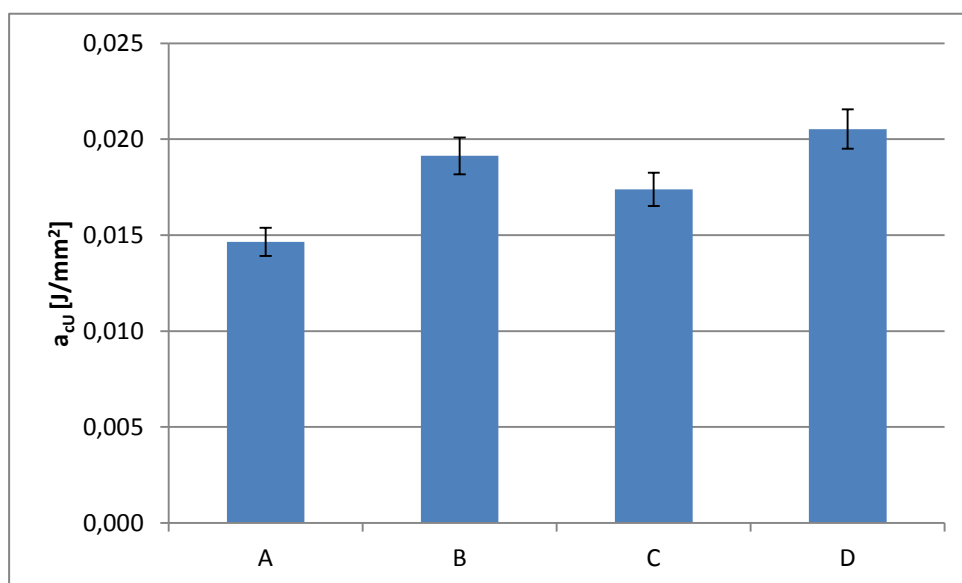
Z naměřených hodnot byly vypočteny průměrné hodnoty, ze kterých byla vypočítána rázová houževnatost testovaného kompozitu, která je znázorněna v následujících tabulkách.

Tab. č. 2.5: Rázová houževnatost pro kompozit s výškou 2,5 mm

Typ	Plocha	Energie nárazu	Rázová houževnatost
	$S \text{ [mm}^2\text{]}$	$E_c \text{ [J]}$	$a_{cU} \text{ [J/mm}^2\text{]}$
A	21,84	0,32	0,015
B	19,33	0,37	0,019
C	20,72	0,36	0,017
D	22,75	0,46	0,021
Průměrná hodnota	21,16	0,38	0,018

Na obr. č. 2.24 je znázorněn graf rázové houževnatosti pro kompozit s výškou 2,5 mm. Z grafu vyplývá, že nejvyšší rázovou houževnatost dosahuje kompozit opětovně nasycený a vytvrzený vyrobený lisováním. U obou kompozitů opětovně nasycených a vytvrzených (B a D) se překrývají intervaly spolehlivosti a to znamená, že výsledné hodnoty jsou srovnatelné

Opětovné nasycení a vytvrzení jak u lisovaného, tak nelisovaného kompozitu dosáhly vyšších hodnot než kompozity nasycené a vytvrzené pouze jednou.



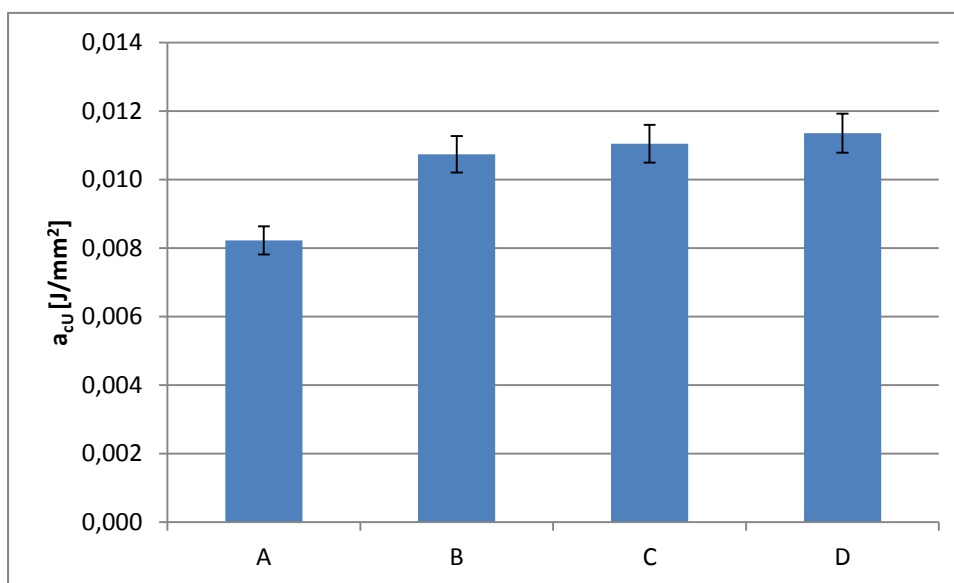
Obr. č. 2.24: Graf rázové houževnatosti  $a_{cU} \text{ [J/mm}^2\text{]}$  pro kompozit s výškou 2,5 mm

Tab. č. 2.6: Rázová houževnatost pro kompozit s výškou 5 mm

Typ	Plocha	Energie nárazu	Rázová houževnatost
	$S [\text{mm}^2]$	$E_c [\text{J}]$	$a_{cU} [\text{J}/\text{mm}^2]$
A	44,98	0,37	0,008
B	34,60	0,37	0,011
C	38,96	0,43	0,011
D	42,00	0,48	0,011
<b>Průměrná hodnota</b>	<b>40,14</b>	<b>0,41</b>	<b>0,010</b>

Na obr. č. 2.25 je znázorněn graf rázové houževnatosti pro kompozit s výškou 5 mm. Z grafu vyplývá, že nejvyšší rázovou houževnatost dosahuje kompozit opětovně nasycený a vytvrzený vyrobený lisováním. Vzhledem k překrývajícím se intervalům spolehlivosti u kompozitů B, C a D jsou výsledné hodnoty srovnatelné.

U kompozitů s výškou 5 mm má větší vliv způsob výroby kompozitu než-li opětovné vytvrzení a nasycení.



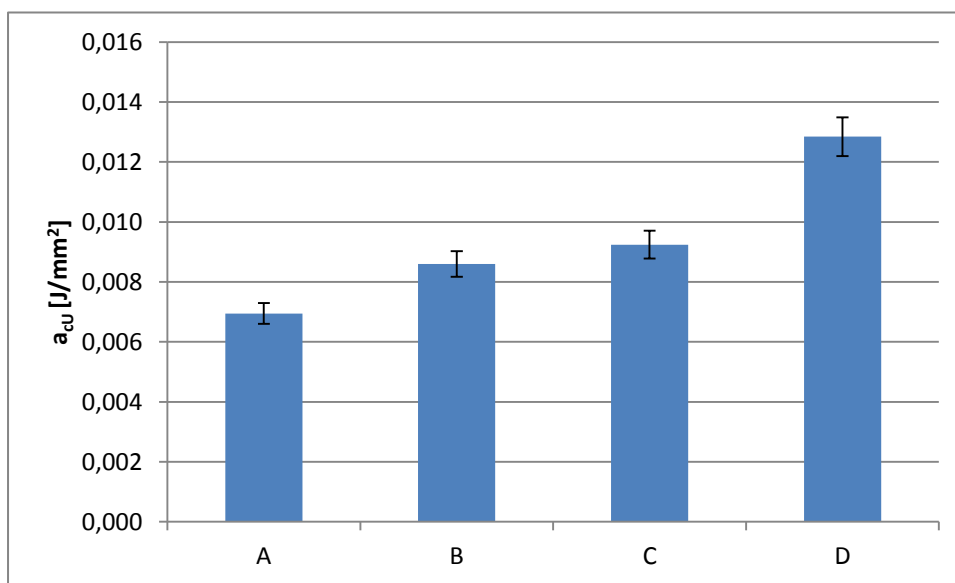
Obr. č. 2.25: Graf rázové houževnatosti  $a_{cU} [\text{J}/\text{mm}^2]$  pro kompozit s výškou 5 mm

Tab. č. 2.7: Rázová houževnatost pro kompozit s výškou 7,5 mm

Typ	Plocha	Energie nárazu	Rázová houževnatost
	$S \text{ [mm}^2\text{]}$	$E_c \text{ [J]}$	$a_{cu} \text{ [J/mm}^2\text{]}$
A	65,65	0,45	0,007
B	56,63	0,49	0,009
C	56,28	0,52	0,009
D	57,36	0,74	0,013
<b>Průměrná hodnota</b>	<b>58,98</b>	<b>0,55</b>	<b>0,009</b>

Na obr. č. 2.26 je znázorněn graf rázové houževnatosti pro kompozit s výškou 7,5 mm. Z grafu vyplývá, že nejvyšší rázovou houževnatost dosahuje kompozit opětovně nasycený a vytvrzený vyrobený lisováním.

U kompozitů s výškou 7,5 mm má větší vliv způsob výroby kompozitu než-li opětovné vytvrzení a nasycení.



Obr. č. 2.26: Graf rázové houževnatosti  $a_{cu} \text{ [J/mm}^2\text{]}$  pro kompozit s výškou 7,5 mm

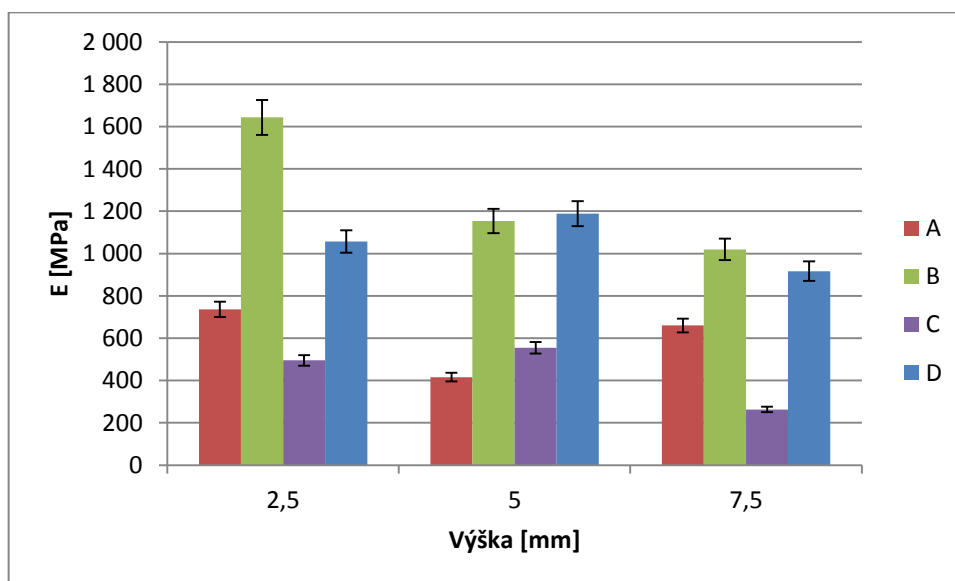


## 2.3.4. Celkové vyhodnocení mechanických vlastností

### A. Porovnání kompozitů z hlediska výšky

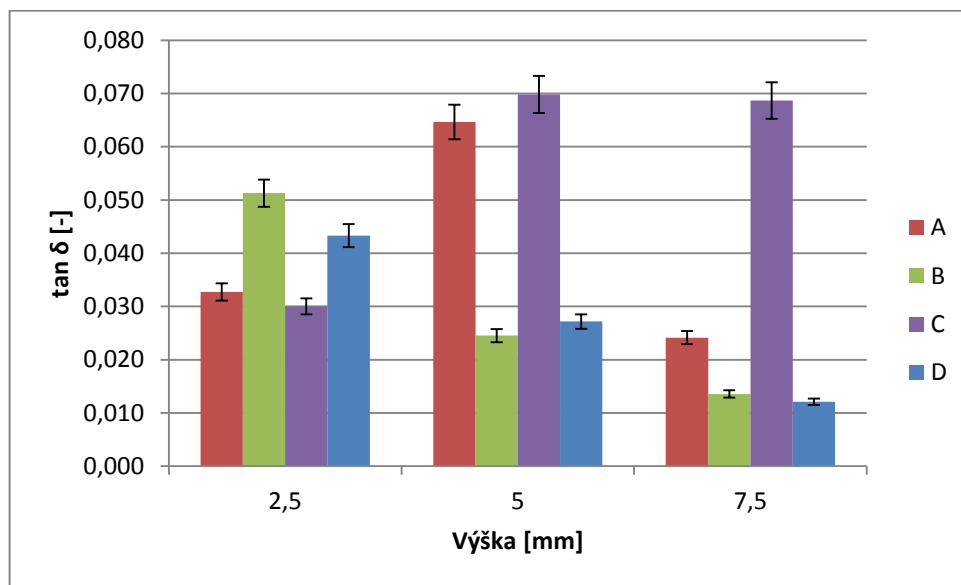
Na obr. č. 2.27, 2.28 a 2.29 jsou znázorněny grafy závislosti komplexního modulu pružnosti  $E$  [MPa], ztrátového úhlu  $\tan \delta$  [-] a rázové houževnatosti  $a_{cU}$  [J/mm<sup>2</sup>] na výšce kompozitu.

Na obr. č. 2.27 je znázorněn graf závislosti komplexního modulu pružnosti  $E$  [MPa] na výšce kompozitu. Z grafu je patrné, že k nejvyššímu nárůstu komplexního modulu pružnosti dochází u vzorků o tloušťce 2,5 mm. To může být způsobeno tím, že je vzorek nejslabší a dojde zde k plnému prosycení vzorku. U vzorků o tloušťce 5 mm a 7,5 mm by pomohlo pomoci ještě další dosycení anebo jiný způsob dosycení a to třeba ponoření do kádinky plné Lukosilu M130 a ponechání po delší dobu v kádince.



Obr. č. 2.27: Graf závislosti modulu pružnosti  $E$  [MPa] na výšce kompozitu

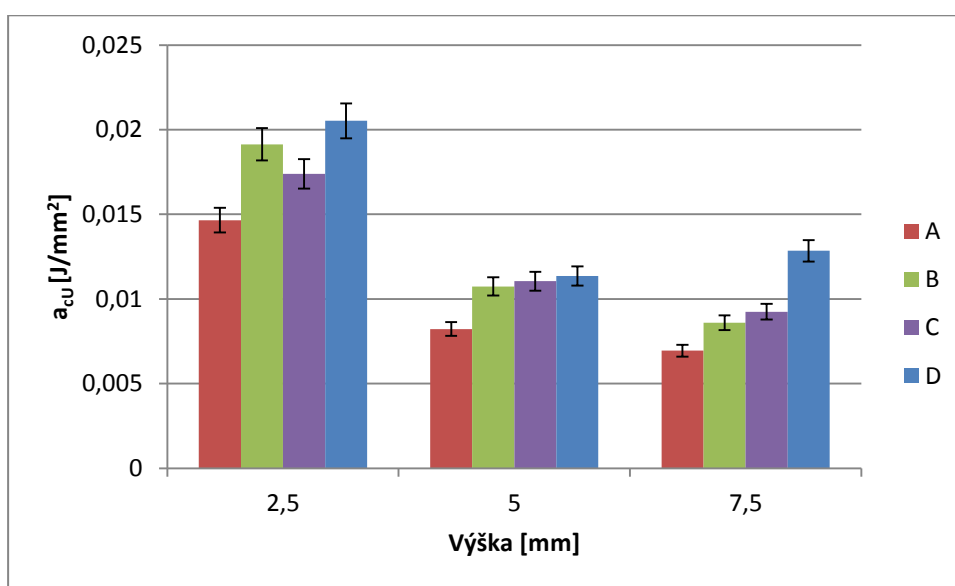
Na obr. č. 2.28 je znázorněn graf závislosti ztrátového úhlu  $\tan \delta$  [-] na výšce kompozitu. Z grafu je vidět, že dosycení má největší vliv na snížení ztrátového úhlu  $\tan \delta$  [-] u vzorku o tloušťce 5 mm a 7,5 mm, ale u vzorku o tloušťce 2,5 mm je jev opačný a dochází zde opětovným dosycením k zvýšení ztrátového úhlu  $\tan \delta$  [-].



Obr. č. 2.28: Graf závislosti ztrátového úhlu  $\tan \delta$  [-] na výšce kompozitu

Změna mechanických vlastností kompozitních materiálů s krátkovlákněným čedičem vlivem lisování

Na obr. č. 2.29, kde je znázorněn graf závislosti rázové houževnatosti  $a_{cU}$  [J/mm<sup>2</sup>] na výšce kompozitu, je patrné, že největší rázovou houževnatost mají vzorky o tloušťce 2,5 mm. Z grafu je také vidět, že opětovné nasycení, ale i způsob výroby mají u všech tloušťek velmi podobné naměřené hodnoty. Žádný vzorek výrazně nepřevyšuje ostatní. Z grafu vyplývá, že u vzorků s opětovným nasycením vždy dojde k nárůstu rázové houževnatosti, ale není tolik výrazný jako u měření komplexního modulu pružnosti a ztrátového úhlu.

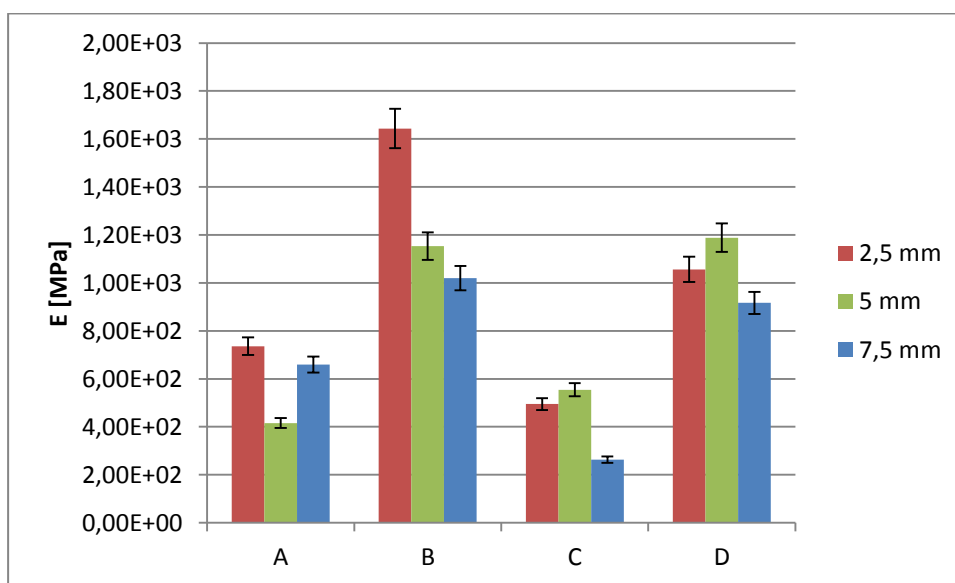


Obr. č. 2.29: Graf závislosti rázové houževnatosti  $a_{cU}$  [J/mm<sup>2</sup>] na výšce kompozitu

## **B. Porovnání kompozitů z hlediska technologie výroby**

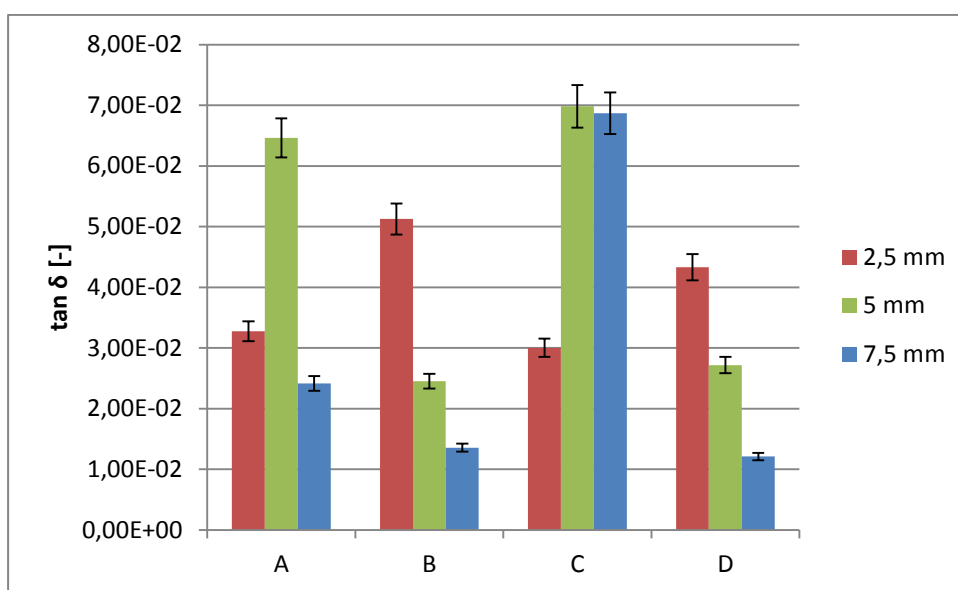
Na obr. č. 2.30, 2.31 a 2.32 jsou znázorněny grafy závislosti modulu pružnosti  $E$  [MPa], ztrátového úhlu  $\tan \delta$  [-] a rázové houževnatosti  $a_{cU}$  [J/mm<sup>2</sup>] na způsobu výroby kompozitu.

Na obr. č. 2.30 je znázorněn graf závislosti komplexního modulu pružnosti  $E$  [MPa] na způsobu výroby kompozitu. Z grafu je patrné, že vzorky s opětovným nasycením dosahují vždy vyšších hodnot a způsob výroby vzorků je nevýrazný. Pro zvýšení komplexního modulu pružnosti by mohl pomoci vylepšený způsob nasycení, a nebo změna tlaku při lisování, aby nedošlo k tak velkému úbytku Lukosilu M130 z kompozitu.



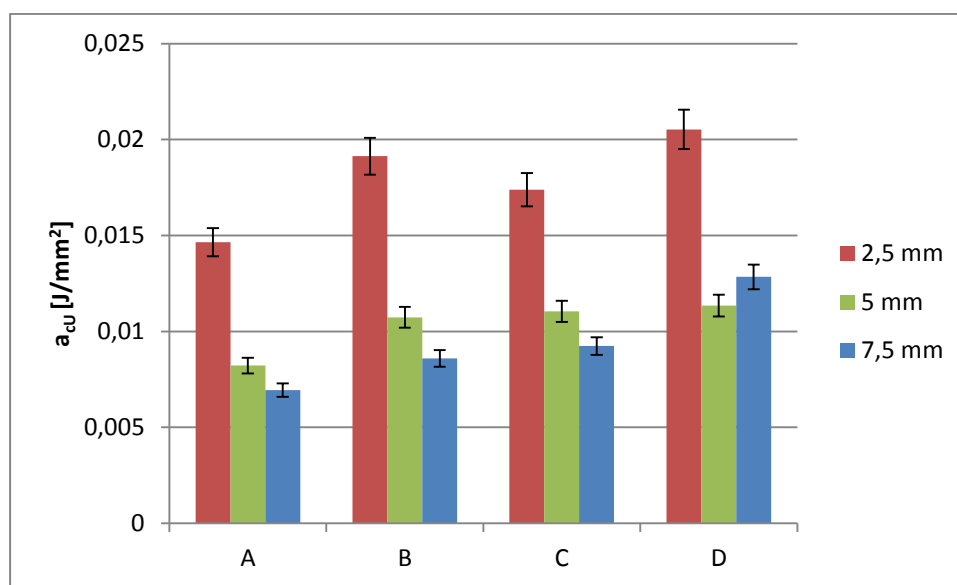
Obr. č. 2.30: Graf závislosti modulu pružnosti  $E$  [MPa] na způsobu výroby kompozitu

Na obr. č. 2.31 je znázorněn graf závislosti ztrátového úhlu  $\tan \delta$  [-] na způsobu výroby kompozitu. Z grafu je patrné, že u silnějších vzorků vždy dosáhneme opětovným nasycením snížení ztrátového úhlu  $\tan \delta$  [-], tento jev však neplatí u nejslabších vzorků. Lisováním vzorku nedosáhneme snížení ztrátového úhlu  $\tan \delta$  [-].



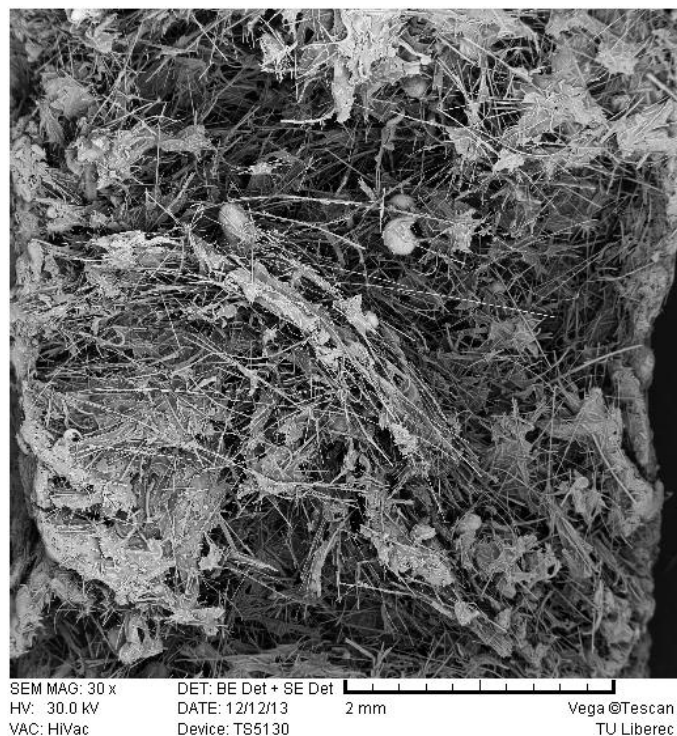
Obr. č. 2.31: Graf závislosti ztrátového úhlu  $\tan \delta$  [-] na způsobu výroby kompozitu

Na obr. č. 2.32 je znázorněn graf závislosti rázové houževnatosti  $a_{cU}$  [ $\text{J}/\text{mm}^2$ ] na způsobu výroby kompozitu. Z grafu vyplývá, že vzorky vyrobené lisováním mají o trochu vyšší hodnoty než-li vzorky nelisované. Opětovné nasycení je zde z hlediska naměřených hodnot méně významné.

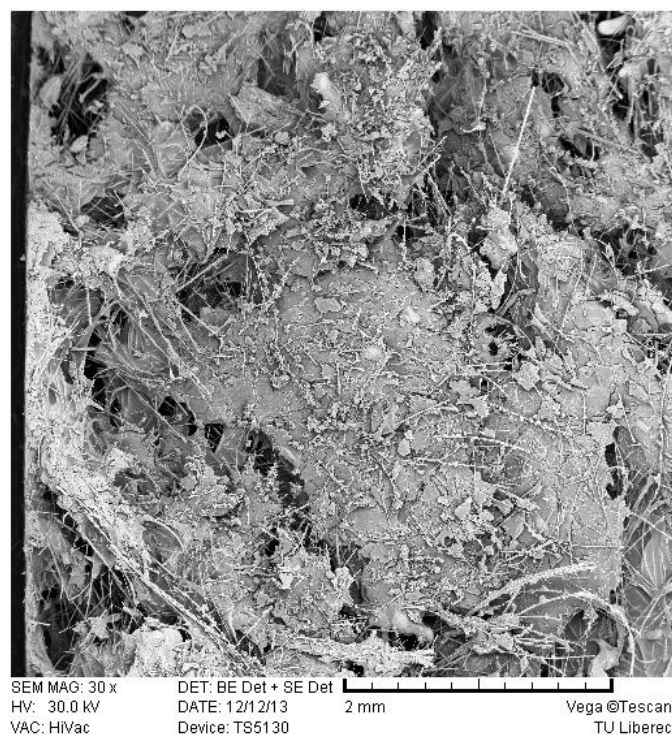


Obr. č. 2.32: Graf závislosti rázové houževnatosti  $a_{cU}$  [ $\text{J}/\text{mm}^2$ ] na způsobu výroby kompozitu

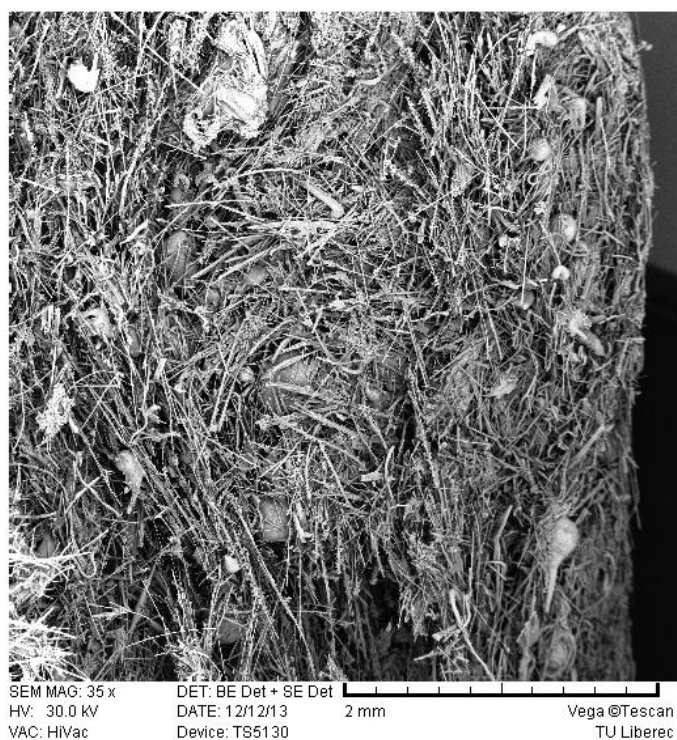
### 2.3.5. Detailní pohled na lom vzorků



Obr. č. 2.37: Detailní pohled na lom vzorku s jedním vytvrzením  $\rho_v = 859,6 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$

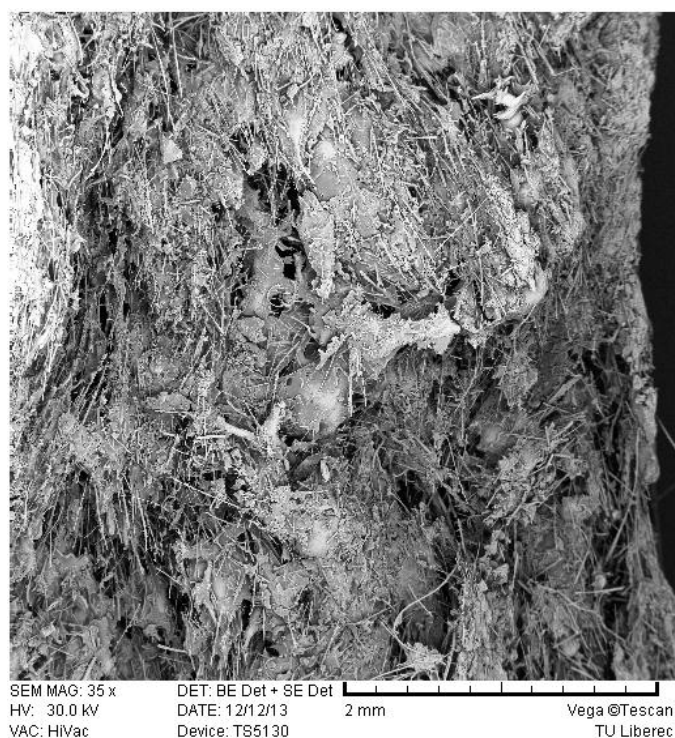


Obr. č. 2.38: Detailní pohled na lom vzorku s opětovným vytvrzením  $\rho_v = 914,7 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$



Obr. č. 2.39: Detailní pohled na lom slisovaného vzorku pouze s jedním vytvrzením

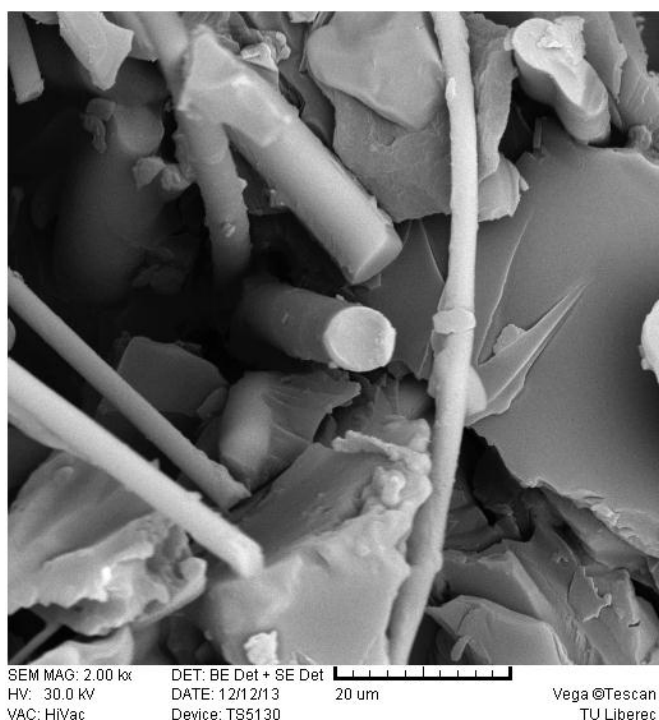
$$\rho_v = 714,8 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$$



Obr. č. 2.40: Detailní pohled na lom slisovaného vzorku s opětovným vytvrzením

$$\rho_v = 1248,5 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$$





Obr. č. 2.41: Detailní pohled na lom vlákna

Z obrázku pořízených na rastrovacím elektronovém mikroskopu, který je umístěn v laboratoři KMI je dobře vidět struktura vzorku a nasycení kompozitu Lukosilem M130. Vzorky s jedním nasycením mají viditelně menší podíl Lukosilu M130 než vzorky s opětovným nasycením což potvrdily i naměřené hodnoty.

Vzorky vyrobené bez lisování mají vlákna orientovaná do všech stran – převládá zde izotropní uspořádání, kdež to vzorky vyrobené na lisu mají vlákna více orientovaná do jednoho směru – převládá zde anizotropní uspořádání.

U vzorků vyrobených lisováním a současným vytvrzením je z detailního pohledu vidět, že není vidět skoro žádná matrice. Velká část matrice byla vytlačena při lisování.

Na obr. č. 2.41 je detailně zachycen lom vlákna v kompozitu. Z pořízeného snímku tedy vyplývá, že se vlákna nevytahují ani nekloužou po sobě, ale dochází tam k lomu vlákna.

### **3. ZÁVĚR**

Cílem diplomové práce bylo vyrobit a otestovat dynamicko – mechanické vlastnosti kompozitu z odpadového krátkovlákněného čediče. Experiment byl navržen tak, že byl odpad smíchán spolu s Lukosilem M130 jako matricí a tím vznikla konzistentní směs. Bylo zapotřebí vyrobit 2 typy kompozitních vzorků. Prvním typem kompozitu bylo napěchování formy směsí a jejím vytvrzením v peci. Druhým typem kompozitu bylo napěchování formy směsí a následně slisování a zároveň vytvrzení na lisu. Těmito způsoby výroby byly získány kompozitní desky, ze které byly vyrobeny menší vzorky pro měření. Část vzorků byla opětovně vytvrzena pro porovnání změn dynamicko – mechanických vlastností.

Pro testování byly zvoleny dvě zkoušky. První zkouškou bylo měření na DMA a druhou zkouškou byl Charpyho test rázové houževnatosti. Na kompozitech byla zjišťována objemová měrná hmotnost pomocí pyknometrické metody. Nejvyšší objemovou měrnou hmotnost dosáhl kompozit opětovně sycený pěchovaný a lisovaný (D). Jediný tento kompozit dosáhl vyšší hodnoty objemové měrné hmotnosti nežli je objemová měrná hmotnost vody.

Měřením na DMA bylo dokázáno, že výsledky měření nebyly tak závislé na způsobu přípravy kompozitní desky, ze které byly vyrobeny kompozitní vzorky pro měření. Významnou roli hraje opětovné nasycení. Podobných hodnot dosahují kompozity 1x sycené jak pouze pěchované, tak pěchované a lisované. U kompozitů opětovně nasycených vzroste komplexní modul pružnosti a sníží se ztrátový činitel. K nejvýraznějšímu zvýšení komplexního modulu pružnosti došlo u kompozitu s výškou 2,5 mm opětovně nasyceného, ale zároveň došlo i k zvýšení ztrátového činitele. Nejlepších hodnot dosáhl vzorek s výškou 5 mm opětovně vytvrzeného jak u kompozitu pouze pěchovaného, tak i pěchovaného a lisovaného, kde došlo jak k výraznému zvýšení komplexního modulu pružnosti, tak k výraznému snížení ztrátového činitele.

Měřením rázové houževnatosti Charpyho testem bylo dokázáno, že nejvyšších naměřených hodnot bylo dosaženo u všech výšek kompozitu (2,5; 5 a 7,5 mm) vyrobeného pěchováním a lisováním (D) s opětovným nasycením. Nejvyšších hodnot dosáhl kompozit s výškou 2,5 mm u všech způsobů výroby. U rázové houževnatosti

Změna mechanických vlastností kompozitních materiálů s krátkovlákným čedičem vlivem lisování  
není tak výrazný rozdíl mezi kompozity 1x nasycenými a opětovně nasycenými. Z ekonomického hlediska by se opětovné sycení mohlo vynechat, aby se zbytečně neprodražila výroba, protože nárůst rázové houževnatosti je nízký.

Z obrázků pořízených na rastrovacím elektronovém mikroskopu bylo zjištěno, že u vzorků vyrobených bez lisování převládá izotropní uspořádání vláken. U vzorků vyrobených lisováním převládá anizotropní uspořádání vláken. Z obrázků je patrné, že při výrobě kompozitů vyrobených lisováním dochází k vytlačení velkého množství Lukosilu M130.

Při výrobě lisovaných kompozitů by bylo dobré se zaměřit na správné nastavení tlaku lisu, aby nedocházelo k tak velkému množství úbytku Lukosilu M130 a tím zabránit nutnosti opětovného nasycení a vytvrzení. Při výrobě kompozitní desky by mohlo zlepšit dynamicko – mechanické vlastnosti prodloužení doby nasáknutí vláken Lukosilem M130. Pro kompozity opětovně vytvrzené by mohla zlepšit dynamicko – mechanické vlastnosti doba dosycení např. ponechat kompozit v kádince s Lukosilem M130 po delší dobu než jen smočení kompozitu v Lukosilu M130.

Použití nově získaného kompozitního materiálu se nabízí zejména v oblasti izolačních materiálů. Další možné využití je, vzhledem k jejich dobrým dynamicko-mechanickým vlastnostem a nízké měrné hmotnosti, v oblasti stavebnictví pro tvorbu konstrukcí apod.

#### **4. POUŽITÁ LITERATURA**

- [1] EHRENSTEIN, G. W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] ASHBY, M. F. Materials Selection in Mechanical Design. Third Edition. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005, 603 s. ISBN 07-506-6168-2.
- [3] Laš, V.: Mechanika kompozitních materiálů. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-7043-273 – X.
- [4] DAĐOUREK, Karel. Kompozitní materiály - druhy a jejich užití. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 114 s. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [5] MIŠEK, Bohumil. Kompozity. 1. vyd. Brno: Technický dozorčí spolek Brno - Sekce materiálů a svařování, 2003, 81 s. ISBN 80-903-3860-7.
- [6] BAREŠ, R. A. Kompozitní materiály. 1. vyd. Praha: SNTL, 1988, 325 s.
- [7] Kořínek, Zdeněk. Kompozity [online]. [cit. 28.10.2013]. Dostupné z: <<http://www.volny.cz/zkorinek/>>
- [8] AGARWAL, B. D. - BROUTMAN, L. J. Vláknové kompozity. 1. vyd. Praha : SNTL, 1987, 294 s.
- [9] Lehner, J.: Skleněná, horninová a strusková vlákna, SNTL Praha 1960
- [10] Kolektiv autorů: STRUTEX. 1. vyd. Liberec: TU, 2008. ISBN 978-80-7372-418-4
- [11] Skripta TU Liberec [online]. [cit. 1.10.2013]. Kompozity. Dostupné z: <<https://skripta.ft.tul.cz/databaze/data/2007-11-21/08-48-11.pdf>>
- [12] Skripta.ft.tul.cz [online]. [cit. 10.2.2013]. Textilní kompozity. Dostupné z: <<https://skripta.ft.tul.cz/databaze/data/2006-03-16/12-54-35.pdf>>

- [13] IMaterialy [online]. [cit. 9.2.2013]. Polymerní vláknové kompozity. Dostupné z: <<http://www.imaterialy.cz/clanky/plasty-pro-architekturu-astavebnictvi-6-recyklace-plastu/2967/plasty-pro-stavebnictvi-a-architekturu-7-polymernivlaknove-kompozity>>
- [14] Delta.fme.vutbr [online]. 2009 [cit. 8.9.2013]. Kompozity. Dostupné z: <<http://delta.fme.vutbr.cz/mikromechanika/kompozityA4.pdf>>.
- [15] Militký, J.: Přednášky: Textilní vlákna; Speciální vlákna. Liberec: TU 2005. 423s.
- [16] Kolektiv autorů. Tavené horniny [online]. [cit. 28.11.2013]. Dostupné z: <[http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/tavene\\_horniny.html#pojmy](http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/tavene_horniny.html#pojmy)>
- [17] Petrografie [online]. [cit. 3.11.2013]. Bazalt (čedič). Dostupné z: <<http://petrol.sci.muni.cz/poznavanihornin/magmatity/bazalt.htm>>.
- [18] Kunteová, P.: Dynamicko-Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů s pletenou čedičovou a skleněnou výztuží. Liberec: Diplomová práce, 2009
- [19] Lexis [online]. [cit. 28.11.2013]. Method for manufacturing basalt fiber. Dostupné z: <[http://v3.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument;jsessionid=F2481A4CDBE90E37EFE947A86511332A.espacenet\\_levelx\\_prod\\_2?FT=D&date=20070104&DB=&locale=&CC=US&NR=2007000721A1&KC=A1](http://v3.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument;jsessionid=F2481A4CDBE90E37EFE947A86511332A.espacenet_levelx_prod_2?FT=D&date=20070104&DB=&locale=&CC=US&NR=2007000721A1&KC=A1)>.
- [20] Institut geologického inženýrství [online]. [cit. 28.1.2011]. Tavené horniny. Dostupné z: <[http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/tavene\\_horniny.html#pojmy](http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/tavene_horniny.html#pojmy)>
- [21] Basaltex [online]. 2004 [cit. 1.12.2013]. Zpracování nekonečných čedičových vláken do technických výrobků. Dostupné z: <<http://www.basaltex.cz/>>.
- [22] Skripta TU Liberec [online]. [cit. 15.10.2013]. Dostupné z: <<http://www.ft.tul.cz/depart/ktm/files/20060106/prednaska7.pdf>>

[23] Lučební závody Kolín. Lukosil M130 [online]. [cit. 22.10.2013]. Dostupné z: <[http://www.pzservis.cz/izol\\_projektanti2/lucebni/lukosilx.htm](http://www.pzservis.cz/izol_projektanti2/lucebni/lukosilx.htm)>

[24] Lučební závody Kolín. Lukosil M130 [online]. [cit. 7.10.2013]. Dostupné z: <[http://www.stavochemie.cz/tl/LZK\\_TL\\_Lukosil\\_M130.pdf](http://www.stavochemie.cz/tl/LZK_TL_Lukosil_M130.pdf)>

[25] DRIML, Bohuslav. Základní vlastnosti materiálů a jejich zkoušení [online]. [cit. 16.11.2013]. Dostupné z: <[http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky\\_mat.pdf](http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf)>

[26] ČSN EN ISO 179-1. Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy - Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška. 2010.

[27] Manuál přístroje DMA DX04T (1999)

[28] LABORTECH s. r. o. Charpyho kladivo [online]. [cit. 2.11.2013]. Dostupné z: <<http://www.labortech.cz/produkty/charpyho-kladiva/serie-chk-5-50j/>>

[29] Vybrané vlastnosti vrstvených ocelí. Charpyho kladivo [online]. [cit. 2.11.2013]. Dostupné z: <<http://www.noze-nuz.com/recenze/vlastnosti-damasku/vlastnosti-damasku.php>>

## Seznam obrázků

Obr. č. 1.1: Průběh synergického efektu [11] .....	13
Obr. č. 1.2: Mikroskopický pohled na řez vlákněného kompozitu.....	14
Obr. č. 1.3: Dělení částicové výztuže [3].....	15
Obr. č. 1.4: Dělení vláknové výztuže [3].....	15
Obr. č. 1.5: Čedičové „varhany“ [16] .....	19
Obr. č. 1.6: Detail čedičových sloupců [16] .....	19
Obr. č. 1.7: Schéma výroby čedičovo – struskového vlákna [23] .....	22
Obr. č. 1.8: Schéma výroby kontinuálních čedičových vláken [19].....	22
Obr. č. 1.9: Graf vytvrzování Lukosilu M 130 [23] .....	27
Obr. č. 2.1: Čedičová vlákna.....	29
Obr. č. 2.2: Lukosil M 130.....	29
Obr. č. 2.3: Kovová deska.....	30
Obr. č. 2.4: Rám formy kovový .....	30
Obr. č. 2.5.: Horkovzdušná pec – HS 122 .....	30
Obr. č. 2.6: Forma na plechové desce s teflonovým papírem.....	31
Obr. č. 2.7: Napěchovaná směs ve formě .....	31
Obr. č. 2.8: Napěchovaná směs v papírovém rámečku pro lisování.....	32
Obr. č. 2.9: Hydraulický vyhřívaný lis HVL 50 .....	33
Obr. č. 2.10: Ukázka vzorků připravených pro měření .....	34
Obr. č. 2.11: Rozklad absolutní hodnoty komplexního modulu [22] .....	36
Obr. č. 2.12: Hysterezní křivka [27] .....	37
Obr. č. 2.13: Blokované schéma DMA DX04T [27].....	38
Obr. č. 2.14: přípravek pro 3 – bodový ohyb.....	39
Obr. č. 2.15: Charpyho kladivo LabTest ® CHK 50J [28].....	40
Obr. č. 2.16: Schema Charpyho kladivo [29] .....	40
Obr. č. 2.17: Graf objemové měrné hmotnosti .....	44
Obr. č. 2.18: Graf závislosti komplexního modulu pružnosti $E$ [MPa] na způsobu výroby kompozitů s výškou 2,5 mm.....	46
Obr. č. 2.19: Graf závislosti ztrátového úhlu $\tan \delta$ [-] na způsobu výroby kompozitů s výškou 2,5 mm .....	47
Obr. č. 2.20: Graf závislosti komplexního modulu pružnosti $E$ [MPa] na způsobu výroby kompozitů s výškou 5 mm.....	49

Obr. č. 2.21: Graf závislosti ztrátového úhlu $\tan \delta$ [-] na způsobu výroby kompozitů s výškou 5 mm .....	50
Obr. č. 2.22: Graf závislosti komplexního modulu pružnosti $E$ [MPa] na způsobu výroby kompozitů s výškou 7,5 mm.....	52
Obr. č. 2.23: Graf závislosti ztrátového úhlu $\tan \delta$ [-] na způsobu výroby kompozitů s výškou 7,5 mm .....	53
Obr. č. 2.24: Graf rázové houževnatosti $a_{cU}$ [J/mm <sup>2</sup> ] pro kompozit s výškou 2,5 mm ..	54
Obr. č. 2.25: Graf rázové houževnatosti $a_{cU}$ [J/mm <sup>2</sup> ] pro kompozit s výškou 5 mm .....	55
Obr. č. 2.26: Graf rázové houževnatosti $a_{cU}$ [J/mm <sup>2</sup> ] pro kompozit s výškou 7,5 mm ..	56
Obr. č. 2.27: Graf závislosti modulu pružnosti $E$ [MPa] na výšce kompozitu .....	57
Obr. č. 2.28: Graf závislosti ztrátového úhlu $\tan \delta$ [-] na výšce kompozitu .....	58
Obr. č. 2.29: Graf závislosti rázové houževnatosti $a_{cU}$ [J/mm <sup>2</sup> ] na výšce kompozitu ...	59
Obr. č. 2.30: Graf závislosti modulu pružnosti $E$ [MPa] na způsobu výroby kompozitu .....	60
Obr. č. 2.31: Graf závislosti ztrátového úhlu $\tan \delta$ [-] na způsobu výroby kompozitu ..	61
Obr. č. 2.32: Graf závislosti rázové houževnatosti $a_{cU}$ [J/mm <sup>2</sup> ] na způsobu výroby kompozitu .....	62
Obr. č. 2.37: Detailní pohled na lom vzorku s jedním vytvrzením $\rho_v = 859,6$ [kg.m <sup>-3</sup> ]..	63
Obr. č. 2.38: Detailní pohled na lom vzorku s opětovným vytvrzením $\rho_v = 914,7$ [kg.m <sup>-3</sup> ] .....	63
Obr. č. 2.39: Detailní pohled na lom slisovaného vzorku pouze s jedním vytvrzením $\rho_v = 714,8$ [kg.m <sup>-3</sup> ] .....	64
Obr. č. 2.40: Detailní pohled na lom slisovaného vzorku s opětovným vytvrzením $\rho_v = 1248,5$ [kg.m <sup>-3</sup> ] .....	64
Obr. č. 2.41: Detailní pohled na lom vlákna .....	65



## **Seznam tabulek**

Tab. č. 1.1: Základní provedení čedičových vláken [21].....	23
Tab. č. 1.2: Porovnání vlastností čedičových a skleněných vláken [21] .....	23
Tab. č. 1.3: Základní parametry Lukosil M 130 [23] .....	28
Tab. č. 2.1: Průměrná objemová měrná hmotnost [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] .....	43
Tab. č. 2.2: Vzorky s výškou 2,5 mm .....	45
Tab. č. 2.3: Vzorky s výškou 5 mm .....	48
Tab. č. 2.4: Vzorky s výškou 7,5 mm .....	51
Tab. č. 2.5: Rázová houževnatost pro kompozit s výškou 2,5 mm .....	54
Tab. č. 2.6: Rázová houževnatost pro kompozit s výškou 5 mm .....	55
Tab. č. 2.7: Rázová houževnatost pro kompozit s výškou 7,5 mm .....	56

## Seznam příloh

Příloha č. 1: Výsledky měření včetně základních statistických výpočtů a grafů (CD)

Příloha č. 2: Průběhy dynamické ohybové zkoušky

### Příloha č. 2

